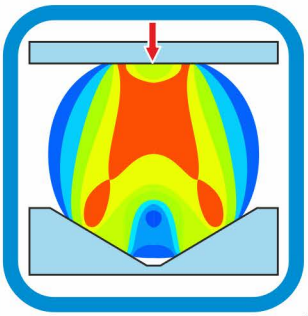
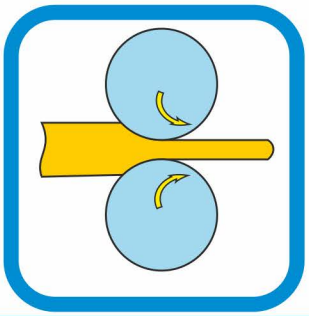
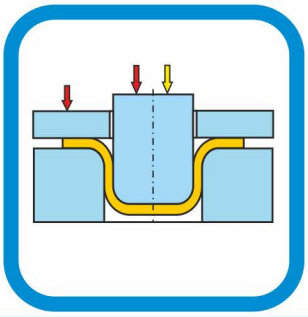
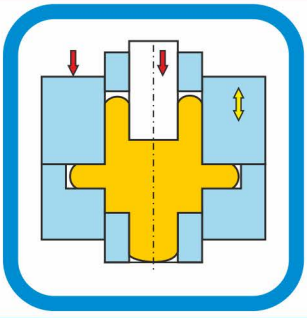
ISSN 2076-2151

ОБРОБКА МАТЕРІАЛІВ ТИСКОМ

MATERIALS WORKING BY PRESSURE
UMFORMTECHNIK
ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

№ 1(51)
2022

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ
ДОНБАСЬКА ДЕРЖАВНА МАШИНОБУДІВНА АКАДЕМІЯ
(ДДМА)

ОБРОБКА МАТЕРІАЛІВ ТИСКОМ

ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ

Видається 2–3 рази на рік

Засновано у травні 2008 р.

№ 1 (51) 2022

Краматорськ
ДДМА
2022

УДК 621.7

ОБРОБКА МАТЕРІАЛІВ ТИСКОМ
Збірник наукових праць
№ 1 (51) 2022

Засновник і видавець
Донбаська державна машинобудівна академія
Свідоцтво
про державну реєстрацію
серія КВ № 13770-2744Р
від 17.03.2008

MATERIALS WORKING BY PRESSURE
Collection of science papers
№ 1 (51) 2022

Founder and publisher
Donbass State Engineering Academy
Registration certificate № 13770-2744P dated 17.03.2008

ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ ДАВЛЕНИЕМ
Сборник научных трудов
№ 1 (51) 2022

Основатель и издатель
Донбасская государственная машиностроительная академия
Свидетельство
про государственную регистрацию
серия КВ № 13770-2744Р
от 17.03.2008

Збірник «ОБРОБКА МАТЕРІАЛІВ ТИСКОМ = MATERIALS WORKING BY PRESSURE» включено до **Переліку наукових фаховихвидань України категорії «Б»** з технічних наук, за спеціальностями 131, 132 **(наказ МОН України № 320 від 07.04.2022 р.).**

Журнал включено до наукометричних баз, електронних бібліотек та репозитаріїв: National Library of Ukraine (Vernadsky), GoogleScholar, Crossref.

Рекомендовано до друку вченою радою Донбаської державної машинобудівної академії (протокол № 11 від 30.06.2022 р.).

Редакційна колегія:

Алієв І. С., д-р техн. наук, проф. (голова редакційної колегії); Таган Л. В., канд. техн. наук, (відповідальній секретар); Жбанков Я. Г., д-р техн. наук, доц. (заст. голови редакційної колегії); Грибков Е. П., д-р техн. наук, доц. (заст. гол. редакційної колегії); Абхарі П., д-р техн. наук, проф.; Алієва Л. І., д-р техн. наук, проф.; Баглюк Г. А., д-р техн. наук, проф., член-кор. НАН України; Бейгельзімер Я. Ю., д-р техн. наук, проф.; Гогаєв К. О., д-р техн. наук, проф., член-кор. НАН України; Головко О. М., д-р техн. наук, проф. (Німеччина); Грушко О. В., д-р техн. наук, проф.; Дашіч П., д-р техн. наук, проф. (Сербія); Драгобецький В. В., д-р техн. наук, проф.; Калюжний В. Л., д-р техн. наук, проф.; Кухар В. В., д-р техн. наук, проф.; Лежнев С. М., канд. техн. наук, проф. (Казахстан); Марков О. Є., д-р техн. наук, проф.; Міленін А. А., д-р техн. наук, проф. (Польща); Найзабеков А. Б., д-р техн. наук, проф. (Казахстан); Орлов Д. В., канд. техн. наук, проф. (Швеція); Приходько І. Ю., д-р техн. наук, ст. наук. співроб.; Розов Ю. Г., д-р техн. наук, проф.; Сивак Р. І., д-р техн. наук, доц.; Тараненко М. Є., д-р техн. наук, проф.; Тарасов О. Ф., д-р техн. наук, проф.; Титов В. А., д-р техн. наук, проф.; Тришевський О. І., д-р техн. наук, проф.; Фролов Я. В., д-р техн. наук, проф.

Відповідальний редактор випуску д-р техн. наук, проф. Алієв І. С.
Науковий редактор випуску д-р техн. наук, проф. Марков О. Є.

Обробка матеріалів тиском = Materials working by pressure: збірник наукових праць. – Краматорськ : ДДМА, 2022. – № 1 (51). – 242 с.
ISSN 2076-2151

У збірнику розміщено статті різних напрямків процесів і машин обробки матеріалів тиском, підготовлені професорсько-викладацьким складом, науковими співробітниками, аспірантами, здобувачами, фахівцями. Збірник призначений для наукових й інженерних працівників, аспірантів і студентів.

Different articles of various directions of processes and machines of materials forming, prepared by the faculty, scientific employees, post-graduate students, competitors, experts are placed in this collection. The collection is intended for scientific and engineering workers, post-graduate students and students.

Статті прорецензовано членами редакційної колегії. Матеріали номера друкуються мовою оригіналу.

ISSN 2076-2151

© Донбаська державна машинобудівна академія, 2022
© Donbass State Engineering Academy, 2022

DOI: 10.37142/2076-2151/2022-1(51)3

SOKOLOV LEV NIKOLAEVICH
(for 100th anniversary)

Sokolov Lev Nikolaevich,
Doctor of Technical Sciences,
Professor

February 23, 2022 highlights the 100th anniversary of the birth of a remarkable scientist - blacksmith, Doctor of Technical Sciences, Honored Worker of Higher Education, Professor Lev Nikolaevich Sokolov.

Prof Sokolov is known to the scientific community as a scientist who fruitfully worked on solving the accute problems of increasing the efficiency of forging production and enriching science with significant works in the field of metal forming.

Lev Nikolaevich Sokolov was born in Yukhnov, Kaluga Region.

In 1939 Sokolov L. N enrolled into the Moscow Institute of Steel. From 1941 to 1944 he was the member of the Red Army. After graduating from the 2nd Tomsk Artillery School, he took part in fights on the Southwestern and Voronezh fronts. In the military rank of lieutenant, he was demobilized after being seriously wounded.

He completed studies at the Moscow Institute of Steel with specialization in Metal Forming in 1947. After graduating from the institute, he worked in the city of Kirov at the aircraft factory named after Lepse as an engineer, senior engineer, and deputy shop manager.

In 1950 he entered the graduate school of the Moscow Institute of Steel. His supervisor was Professor, Corresponding Member of the USSR Academy of Sciences V. P. Eliutin. Sokolov L. N. was among first in the country to develop and to publish the results of studies on hot forming modes and technical plasticity diagrams for titanium. In 1953 he defended candidate dissertation on the topic "Investigation of the technical plasticity of titanium ".

The entire following life of Sokolov L.N. is linked to the Donbass region.

After the graduate school, he was sent to Zhdanov Metallurgical Institute (Priazovskyi State Technical University in Mariupol now) where over the course of 22 years he evolved from assistant to associate professor and the head of the Forging and Stamping Department, and then to professor and vice-rector for scientific work at the institute. In 1970, Sokolov L. N. defended his doctoral dissertation on the topic "Forging ingots".

In 1975, Professor Sokolov L. N. became appointed the Rector of the Kramatorsk Industrial Institute (KII, now Donbass State Engineering Academy - DSEA). Concurrently, he became the head of the Metal Forming Department, which was recreated by him in 1976.

His name is associated with the formation and development of the scientific school of DSEA in the field of metal forming, which made a significant contribution to the development of theory, technology, and equipment for forging and stamping production (FSP). For 12 years of L. N. Sokolov's work as a rector at the institute, the scientific and the methodological levels of education process, and the effectiveness of research work significantly increased. The volume of scientific research at the institute doubled, economic effect from the implementation of developments into production increased almost 3 times, and the number of copyright certificates received for new technical developments increased 5 times.

Department Council
(from left to right : Efimov V.N., Aliiev I.S., Kulishov A.A., Sokolov L.N.), 1984 year

The staff of Metal Forming Department, 1999 year

Metal Forming Department turned into a major center for the development of forming processes – a kind of creative laboratory, in which the scientific team of like-minded people carried out research and development work in various directions.

Working at the DSEA, Professor Sokolov L. N. used and improved his rich experience in scientific, pedagogical and methodological work. He read special courses: "Theory of Metal Forming", "Forging Technology", "Hot Die Forging", "Technological Equipment for Die Forging", "New Materials in Mechanical Engineering", supervised course and diploma designing, research work of students and masters (RWS), graduate students and doctoral students.

Professor Sokolov L. N. launched a scientific direction at the department related to the study of hot plastic deformation processes. The main scientific works were devoted to the study of metals and alloys softening in the process of hot deformation, forging of large products and extrusion of secondary aluminum alloys. Together with collaborators, he carried out deep theoretical and experimental studies of the hardening and softening of most common steels and alloys in the range of forging temperatures. The significant effect of hardening and softening on the power modes of forging and stamping have been proved. The theory of hardening-softening developed by him and the analytical dependencies of deformation resistance derived from it formed the basis for calculating automatic control systems for hydraulic forging presses. New methods have been developed for determining the yield strength of metals in a hot state. In particular, the staged cooling method, which allows one sample to obtain the dependence of the yield strength on temperature immediately. The study of the eighty most common steel grades and alloys hardening-softening allowed establishing that for hot-worked austenite, the relative hardening under given temperature-speed deformation conditions is a constant value. This law made it possible to develop a simple and reliable method for determining the resistance to metal forming in a wide range of changes in temperature and rate parameters for processes. Considering softening in the processes of hot metal forming, Sokolov L. N. proposed a method for calculating equivalent strain rate, which allows developing technological modes of forging and stamping with minimal energy consumption.

Sokolov L. N. at the workplace, 2001 year

Extensive research has been carried out to improve the processes of forging large forging products (eliminating the roughing operation, establishing optimal forgings when forging large ingots, new options for forging die blocks, etc.). He developed new types of large unprofitable ingots and energy-saving technological processes for their forging. New technological processes were introduced at various large plants of the ferrous metallurgy and heavy engineering ministries, such as Dneprospetsstal, Illich Iron and Steel Works, New Kramatorsk Machine-Building Factory, etc.

Extensive research has been carried out on the effect of forging upsetting and broaching operations on the mechanical properties of large ingot forgings. Optimal forges have been established for forging ingots, providing a reduction in the number of removals and significant savings in forging time. The effect of billeting operation on the quality of forgings has been studied. Recommendations for reducing forgings during broaching from 4-5 to 2-2.5 are applied at all plants producing large forgings.

The research results are implemented at Azovmash. At this plant, since 1958, the roughing operation has been excluded from all technological processes for forging ingots.

A great achievement in the field of forging is the rational technological process developed by Professor L. N. Sokolov for forging large solid disks from unprofitable ingots.

Dealing with the problems of improvement, durability and reliability of stamps, Professor L. N. Sokolov developed new options for forging stamp blocks.

After the launch of the first converter shop at the Mariupol Illich Iron and Steel Works, as a result of deep and comprehensive studies of the cast metal structure, the possibility of manufacturing large forgings from converter steel was proved.

L.N. Sokolov with graduates and colleagues after graduation ceremony
(left–1985 year; right –2003 year)

The introduction of an intermediate product (granules) in steelmaking has allowed to simplify and reduce significantly the cost of high-alloy steels deoxidation, improve working conditions and contribute to environmental protection. Methods for granulating secondary aluminum alloys have been studied and the possibility of obtaining fundamentally new compositions, such as aluminum alloys with lead, tin, graphite and calcium, have been revealed.

Professor Sokolov L. N. consulted and actively assisted carrying out large-scale work on the creation of fundamentally new designs of hydro-pulse machines with dosed impact energy, as well as machines for cutting bars into dimensional billets during pressing. The developed machines are introduced now into industrial production (Belay Kalitva, Krasnoyarsk, Stupino metallurgical plants). For the development of new forging processes, he was awarded medals of the VDNKh of the USSR and the Ukrainian SSR.

Professor Sokolov L. N. gave a lot of creative energy to the training of scientific staff of the highest qualification. Under his leadership and with direct participation, 10 doctoral and 33 master's dissertations were prepared and defended. He published more than 300 printed works and inventions, including books: the textbook for universities "Theory and technology of forging", "Blacksmith's Handbook", "Forging ingots on presses", the reference manual "For a blacksmith-puncher", "High-temperature hardening and softening of metals and alloys", the textbook "Forging technology". His students and associates, including professors Aliiev I. S., Tarasov A. F., Markov O. E. now continue the glorious scientific traditions at the Metal Forming Department named after prof. Sokolov L. N. and at other departments of the DSEA.

Members of the specialized dissertation council of the DSEA, 2005 year
(from left to right, bottom row: Roganov L. L., Sokolov L. N., Shipilina G. V., Doroshko V.I., Ray R.I., Aliiev I.S.; top row: Beygelzimer Ya. E., Dobronosov Yu. K., Ogorodnikov V A., Tarasov A.F., Satonin A. V., Potapkin V.F., Laptev A.M.)

Professor Sokolov L. N. did a lot of social work. For more than 13 years, he was the Chairman of the specialized council for the defense of doctoral dissertation with specialization in "Processes and Machines of Plastic Working ", organized by him in 1977 at the DSEA. He was a member of the expert council of the USSR Ministry of Higher Education for assessing the level of state budgetary work of universities and their financing in the field of metallurgy, he was a member of the editorial board of the industry-wide all-Union magazine "Forging and Stamping Production" and headed the editorial group of this magazine in Donbass. Professor Sokolov L. N. was the Chairman of the section "Mechanical Engineering" of the Donetsk Scientific Center of the Academy of Sciences of the Ukrainian SSR, a member of the doctoral council at the Donetsk Institute for Physics and Engineering named after O.O. Galkin of the National Academy of Sciences of Ukraine. He was the Chairman of the committee for forging large forgings at the NTO MASHPROM, the deputy Chairman of the section of the Scientific and technical council "Metallurgy" of the Ministry of Education of the Ukrainian SSR, the Chairman of the Donetsk regional council of RWS, Deputy of the Kramatorsk City Council.

L. N. Sokolov with participants of the Patriotic War, 1987 year

In Recreation center "Tishina": Zolotukhin N. M., Rulev V. I., Sokolov L. N., 1979 year

Sokolov L. N. was a participant and invalid of the Great Patriotic War, a labor veteran. He was awarded the Orders of the Patriotic War of the 1st and 2nd degrees, the Order of Bohdan Khmelnitskii and many medals, the Diploma of the Supreme Council of the Ukrainian SSR for the development of higher education and other distinctions of the Ministry of Education of the USSR and Ukraine. He was awarded the honorary title "Honored Worker of the Higher School of Ukraine".

The basis of the successful, multifaceted activity of Professor L. N. Sokolov was his high personal human qualities, exceptional organization and self-discipline, adherence to principles, an even and benevolent attitude towards employees, colleagues and students, and the ability to implement decisions into life.

Celebration of the 85th Anniversary of L. N. Sokolov

In the last years of his life, Sokolov L. N. worked as a Professor at the Metal Forming Department at the Donbass State Engineering Academy. He continued active creative scientific and pedagogical work until the last days of his life.

He lived almost full 90 bright creative years.

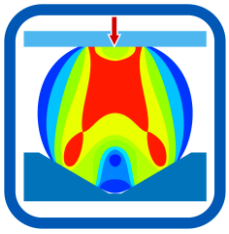
REFERENCES

1. Lev Nikolaevich Sokolov. Time. Life. Events / under total ed. Prof. I.S. Aliiev. Kramatorsk: DSEA. 2012. 180 p. ISBN 978-966-379-617-8. *(in Russian).*

2. Aliiev I. S. Sokolov Lev Nikolaevich. Teacher. Scientist. Leader (to the 90th birthday). *Materials Working by Pressure*. Kramatorsk : DSEA. 2012. 1 (30), pp. 3–7. *(in Russian).*

3. Aliieva L.I., Zhbankov Y.G. 60 years of Metal Forming by DSEA. *Materials Working by Pressure*. Kramatorsk: DSEA. 2017. 1 (44), pp. 3–17. *(in Russian).*

I. S. Aliiev
O. E. Markov



РОЗДІЛ І
МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ОБРОБКИ ТИСКОМ

УДК 621.777.4

DOI: 10.37142/2076-2151/2022-1(51)10

Aliieva L. I.
Levchenko V. M.
Aliiev I. S.
Kartamyshev D. O.

THE DEVELOPMENT OF TRIANGULAR KINEMATIC MODULE TO CALCULATE THE DEFORMATION PRESSURE IN THE EXTRUSION PROCESSES

The article presents the universal kinematic module developed on the basis of the energy upper bound method, designed for use in mathematical simulations of combined processes of cold forging. In particular, this module can be used for force regime simulating and tool loads analyzing at radial-forward extrusion of hollow products with blind hole of continuous workpieces to describe deformation zones during metal flow to the center and turn zones from radial flow to backward one. The kinematically possible velocity field for convex curvilinear (parabolic) triangular module and the equations of its parabolic inclined boundary are given. Analytical dependencies for power of deformation forces, friction and shear at the boundaries of the module, as well as for the reduced pressure in a parametric form are obtained. The developed curvilinear kinematic module, the use of which makes it possible to increase the efficiency of the upper bound method for studying the processes of combined extrusion, has been tested and described. It is shown that value of reduced pressure for the curvilinear turn module is most affected by the relative thickness of the flange, its radius, the thickness of the wall of the tubular workpiece, as well as friction conditions. The possibility of correct using of curvilinear triangular module for the analysis of complex schemes of processes with several zones is demonstrated. The simulation for calculation schemes of radial-forward workpiece extrusion with variable flange height was carried out. It has been determined that the developed curvilinear triangular module due to the reducing the value of the velocity jump at its boundaries, makes it possible to reduce the upper estimate of the tool loads in comparison with the variants of simulations that were previously based on rectangular modules.

Key words: *energy upper bound method, curvilinear kinematic module, modular approach, radial-forward extrusion, tool load, simulation.*

In the range of forged workpieces, the significant volume is occupied by hollow parts with blind hole such as cups and sleeves, which are usually obtained using longitudinal backward and forward extrusion. Typical for longitudinal extrusion processes limitations are associated with the limiting tool loads and the losing tool life, which forces to introduce several serial operations with lower degrees of deformation and additional calibration operations of workpieces before extrusion respectively.

The combined extrusion methods including traditional longitudinal extrusion schemes with transverse (radial and cross side) extrusion schemes can serve as promising methods for stamping hollow parts. Combined extrusion processes can significantly reduce the energy-power parameters of deformation and manufacturing time, improve quality of parts and life of the stamping tool.

The widespread using of combined extrusion, especially in the production of hollow parts, is limited by the development of calculation apparatus for designing technological deformation modes, as well as insufficient knowledge of the stress-strain state of workpieces during deformation using new methods of sequential combined extrusion.

Using modular approach makes it possible to simplify the creating mathematical simulations for complex combined schemes by use of already existing set of tested and implemented modules. This approach requires further research to create universal kinematic modules (including ones with curved surfaces), which allow to more adequately describe the kinematics of metal flow in the deformation zone for combined processes due to the choice of velocity fields of more complex

configurations and the analysis of which can be performed separately from other related modules.

For cold deformation technologies high unit and total deformation forces are characteristic limitations that reduce the stability of the process and the life time of the stamping tool [1, 2]. In the existing deformation methods, that remove these limitations, the reduction of loads on the tool occurs due to the creation of different sign scheme of the stress-strain state [3, 4], expansion [4, 5], decreasing contact area of tool with workpiece [1, 6], and also with the help of additional combined force and kinematic effects on the workpiece [5, 7].

Methods of combined extrusion, which combine schemes of transverse and longitudinal (backward and forward) extrusion, make it possible to obtain parts of the most complex shapes by just one operation [3, 5, 8]. The feature of the methods of sequential combined extrusion is that the direction of metal flow during the deformation process changes from radial (flow with expansion) to forward one. According to the results of the analysis of the stress-strain state of the workpieces, it was established that the process is limited by the action of tool force loads [8].

According to the results of experimental studies, the authors of works [2–5] claim that in the case of forward extrusion with expansion the deformation force is reduced by 16–40 % compared to longitudinal extrusion. The greatest decreasing deformation forces due to the greatest degree of freedom of the metal flow can be achieved if the turning flow of the workpiece material occurs immediately after the metal leaves the volume of the workpiece simultaneously from the side surface of the lower zone of the workpiece and the lower end surface or from direction of the lower zone of side surface. In the process of free (without die) extrusion deep hollow containers are produced, the specific force in this case decreases by 1.5–1.8 times [5, 9]. Free forming in the methods discussed above does not allow obtaining the required shape and dimensions of parts, therefore, for these semi-finished products, drawing on mandrel or direct extrusion are further provided.

Due to the direction of the metal flow into the radial cavity at the beginning of the process, it is possible to increase the outer diameter of the cup. Further, in the turn zone, the flow of the workpiece material will occur in the forward (predominantly) or backward direction. Further development of extrusion methods with intensive expansion led to the emergence of sequential combined radial-forward extrusion (Fig. 1). In this process the developed radial flow of the material contributes to significant increasing in the transverse dimensions of the hollow part [2, 8].

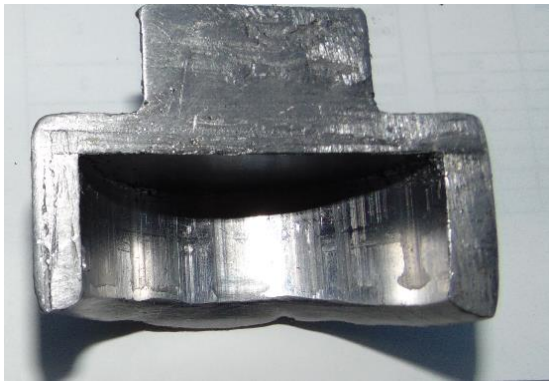


Fig. 1. The part obtained by sequential radial-forward extrusion

At present the most widespread methods for studying the processes of volumetric deformation among the traditional theoretical ones are the analytical energy method of power balance, the upper bound method (UBM) and the finite element method. The main advantages of analytical methods of theoretical analysis include the possibility of developing experimentally observed calculation schemes of metal flow pictures and obtaining analysis results in the form of engineering calculation formulas.

The modular approach used and developed in the Donbass State Engineering Academy (DSEA) can serve to increase the efficiency of the energy method. It is based on the selection and use of pre-developed kinematically possible velocity fields (KPVF) in the form of separate areas [1] or kinematic modules [5, 10–12], which are designed to more accurately describe various prevailing

deformation schemes in plastic zones. Most often, rectangular or quadrangular (rhombic) and triangular modules are used as elementary zones. Their using does not cause problems when obtaining solution, as well as when embedding them in the construction of discontinuous velocity field, but for fields with more complex configuration it is necessary to use modules of complex shapes, including those with curvilinear generatrixes. Therefore, design of new kinematic modules with non-linear geometric characteristics, checking the possibility of using them as components for models of combined radial-forward extrusion processes and determining the limits of parameters that provide acceptable level of tool loads of these processes is the relevant task.

The purpose of the work is to expand the possibilities of the energy method for the theoretical analysis of combined processes of radial-forward extrusion through the creating and using of universal curvilinear kinematic modules.

Calculation schemes of radial-forward extrusion processes are characterized by the presence of the turn area (zone 5) in the deformation zone, where the metal changes the radial direction of the flow to the longitudinal one. For this zone, it is advisable to use curvilinear triangular module for description (Fig. 2). We solve the problem by analogy with the solution for the triangular module used to describe the metal flow to the center of the tubular workpiece [13]. The difference is that in this case, the flow of metal occurs in the backward direction – from the center with turning the direction from radial to forward one. In addition, in this problem, one of the sides of the module is the surface contacting with the die, that is, instead of the power of shear forces, it is necessary to calculate the power of friction forces on this surface.

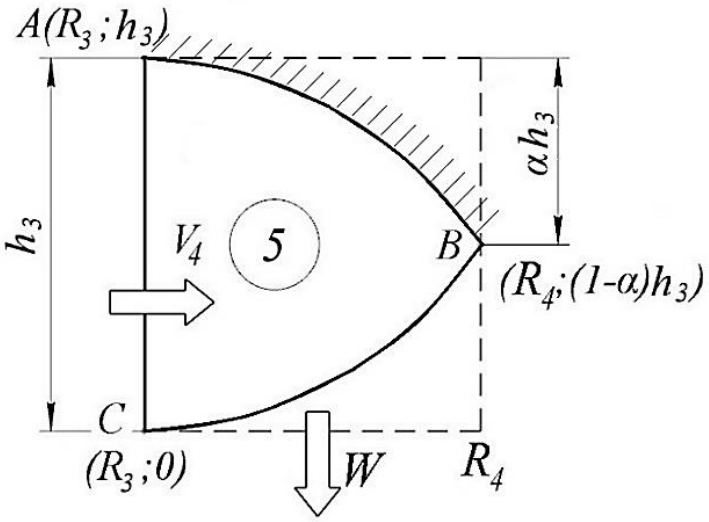


Fig. 2. Scheme of metal flow in the angular curvilinear module

It was found that in the reduction problem, the kinematic field in the form of curvilinear triangle gives the smallest value of the reduced pressure [13]. Thus, a convex (parabolic) triangular module was chosen as the most suitable for solving the problem of radial-forward extrusion with expansion.

We write KPVF for the triangular curvilinear module 5 as follows:

$$\begin{cases} V_{z5} = -\alpha \cdot W; \\ V_{r5} = \dfrac{V_3 \cdot R_3}{r}, \end{cases} \tag{1}$$

where $W = \dfrac{2 \cdot R_3 \cdot h_3}{R_4^{\,2} - R_3^{\,2}} \cdot V_3$.

Taking into account the velocity field represented by these formulas and the condition of continuity of the normal velocity component, the equation for parabolic inclined boundary between

the zones is obtained.

Equation of curvilinear boundaries of module 5:

$$Z'_{AB} = \frac{\frac{-\alpha \cdot W}{V_3 \cdot R_3}}{r} = -\frac{\alpha \cdot W}{V_3} \cdot \frac{r}{R_3}; \quad Z_{AB} = -\frac{\alpha \cdot W}{V_3} \cdot \frac{r^2}{2 \cdot R_3} + C_1; \quad \Leftarrow A(R_3; h_3);$$

$$C_1 = h_3 + \frac{\alpha \cdot W}{V_3} \cdot \frac{R_3}{2}; \quad Z_{AB} = \left(1 - \alpha \cdot \frac{r^2 - {R_3}^2}{{R_4}^2 - {R_3}^2}\right) \cdot h_3; \tag{2}$$

$$Z'_{BC} = \frac{\frac{-\alpha \cdot W + W}{V_3 \cdot R_3}}{r} = \frac{W \cdot (1-\alpha) \cdot r}{V_3 \cdot R_3}; \quad Z_{BC} = \frac{W \cdot (1-\alpha) \cdot r^2}{2 \cdot V_3 \cdot R_3} + C_2; \quad \Leftarrow C(R_3; 0);$$

$$Z_{AB} = (1-\alpha) \cdot \frac{r^2 \cdot {R_3}^2}{{R_4}^2 - {R_3}^2} \cdot h_3. \tag{3}$$

For module 5, where the flow is turned from radial to forward, based on the accepted KPVF, the friction and shear powers are calculated using the known formulas [1]:

$$N_m = \iint\limits_{F_K} \tau_\kappa \cdot |V_\kappa| dF_k; \quad N_c = \iint\limits_{F_c} \tau_s \cdot |V_c| dF_c.$$

The value of the velocity discontinuity at the boundary AB is:

$$|V_z| = -\alpha \cdot C \cdot V_3; \quad C = \frac{2 \cdot R_3 \cdot h_3}{{R_4}^2 - {R_3}^2}.$$

The power of friction forces on the surface AB is calculated as:

$$N_{C_{AB}} = \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}} \cdot \frac{2 \cdot \mu_s}{\sqrt{3}} \cdot 2 \cdot \pi \cdot \int_{R_3}^{R_4} \left| \frac{|V_z|}{f'_{AB}(r)} \cdot r \cdot (1 - f'_{AB}(r))^2 \right| dr =$$

$$= \frac{2 \cdot \pi \cdot \sigma_s}{\sqrt{3}} \cdot \frac{2 \cdot \mu}{\sqrt{3}} \cdot \int_{R_3}^{R_4} \left| \frac{-\alpha \cdot C \cdot V_3}{\frac{\alpha \cdot C \cdot V_3}{R_3}} \cdot r \cdot \left(1 + \left(\frac{-\alpha \cdot C \cdot}{R_3}\right)\right)^2 dr = \right| \tag{4}$$

$$= \frac{2 \cdot \pi \cdot \sigma_s \cdot V_3}{\sqrt{3}} \cdot R_3 \cdot \frac{2 \cdot \mu_s}{\sqrt{3}} \cdot \left(R_4 - R_3 + \alpha^2 \cdot C^2 \cdot \frac{{R_4}^2 - {R_3}^2}{3 \cdot {R_3}^2} \right).$$

At the BC boundary, the value of the velocity discontinuity is:

$$|V_z| = -\alpha \cdot W + W = (1-\alpha) \cdot \frac{2 \cdot R_3 \cdot h_3}{{R_4}^2 - {R_3}^2} \cdot V_3 = (1-\alpha) \cdot C \cdot V_3;$$

$$N_{C_{BC}} = \frac{2\cdot\pi\cdot\sigma_s}{\sqrt{3}}\cdot\int_{R_3}^{R_4}\left|\frac{(1-\alpha)\cdot C\cdot V_3}{\frac{(1-\alpha)\cdot C}{R_3}\cdot r}\cdot r\cdot\left(1+\frac{(1-\alpha)\cdot C}{R_3}\cdot r\right)^2\right|dr = \tag{5}$$

$$= \frac{2\cdot\pi\cdot\sigma_s\cdot V_3\cdot R_3}{\sqrt{3}}\cdot\left(R_4 - R_3 + \frac{(1-\alpha)^2\cdot C^2}{{R_3}^2}\cdot\frac{{R_4}^2-{R_3}^2}{3}\right).$$

At the input speed V_4 according to the energy balance equation at known power of external active forces:

$$N_{\partial 5} = 2\cdot\pi\cdot R_3\cdot h_3\cdot\sigma_s\cdot V_4\cdot\bar{p}_5,$$

the reduced deformation pressure $\bar{p}_5$ is determined as the sum of components that take into account the plastic deformation of module 5, as well as the values of shear and friction on its boundaries:

$$\bar{p}_{cA-B} = \frac{1}{\sqrt{3}\cdot h_3}\cdot\frac{2\cdot\mu_s}{\sqrt{3}}\cdot\left(R_4 - R_3 + \alpha^2\cdot C^2\cdot\frac{{R_4}^2-{R_3}^2}{3\cdot{R_3}^2}\right); \tag{6}$$

$$\bar{p}_{c5-6} = \frac{1}{\sqrt{3}\cdot h_3}\cdot\left(R_4 - R_3 + \frac{(1-\alpha)^2\cdot C^2}{{R_3}^2}\cdot\frac{{R_4}^2-{R_3}^2}{3}\right). \tag{7}$$

To simplify the calculated dependencies for module 5, based on the results of calculating the rates of relative linear deformations, it is recommended to determine the highest absolute value of the rate $|\dot{\varepsilon}_{\max}|$ and use the linearized dependence of the type $\dot{\varepsilon}_i = 1{,}08\cdot|\dot{\varepsilon}_{\max}|$ [14, 15] to calculate the intensity of the strain rate in the zone. As a result, the following expression for the pressure of deformation forces was proposed:

$$\bar{p}_{d5} = \frac{2}{\sqrt{3}}\cdot\left[\left(\frac{\bar{R}_3^2}{\bar{R}_4^2-\bar{R}_3^2}+1\right)\cdot\ln\frac{\bar{R}_4}{\bar{R}_3}-\frac{1}{2}\right]. \tag{8}$$

The share of pressure that takes into account the shear on the boundary is [13]:

$$p_{c4-5} = \frac{2\cdot R_3\cdot h_3\cdot\alpha}{\sqrt{3}\cdot\left({R_4}^2-{R_3}^2\right)}. \tag{9}$$

After calculating the powers of the deformation, shear and friction forces, substituting into the power energy balance equation:

$$p\cdot F\cdot V_0 = \sum N_{di} + \sum N_{fj} + \sum N_{sk},$$

where N_{di} – the power of deformation forces expended on forming,

N_{fj} – the power of friction forces,

N_{sk} – the power of shear force,

all the found values and reducing by factor $2\cdot\pi\cdot\sigma_s\cdot V_4\cdot h_3\cdot R_3$, we obtained dependence for determining the reduced pressure (relative unit force):

$$\bar{p}_5=\left[\begin{array}{l}\dfrac{2}{\sqrt{3}}\cdot\left[\left(\dfrac{{R_3}^2}{{R_4}^2-{R_3}^2}+1\right)\cdot\ln\dfrac{R_4}{R_3}-\dfrac{1}{2}\right]+\dfrac{4\cdot\mu_s}{\sqrt{3}}\cdot\dfrac{l_k}{R_4-R_3}+\dfrac{2\cdot R_3\cdot h_3\cdot\alpha}{\sqrt{3}\cdot\left({R_4}^2-{R_3}^2\right)}+\\ +\dfrac{1}{\sqrt{3}\cdot h_3}\cdot\left[\left(1+\dfrac{2\cdot\mu_s}{\sqrt{3}}\right)\cdot\left(R_4-R_3\right)+\left(\dfrac{2\cdot\mu_s}{\sqrt{3}}\cdot\alpha^2+\left(1-\alpha\right)^2\right)\cdot\dfrac{4\cdot{h_3}^2}{\left({R_4}^2-{R_3}^2\right)^2}\cdot\dfrac{{R_4}^2-{R_3}^2}{3}\right].\end{array}\right] \quad (10)$$

Formula (12) was converted into dimensionless form, that is, related to the inner radius R_3, by dividing all geometric parameters by this radius:

$$\bar{p}_5=\left[\begin{array}{l}\dfrac{2}{\sqrt{3}}\cdot\left[\left(\dfrac{1}{\bar{R}_4{}^2-1}+1\right)\cdot\ln\bar{R}_4-\dfrac{1}{2}\right]+\dfrac{4\cdot\mu_s}{\sqrt{3}}\cdot\dfrac{\bar{l}_k}{\bar{R}_4-\bar{R}_3}+\dfrac{2\cdot\bar{h}_3\cdot\alpha}{\sqrt{3}\cdot\left(\bar{R}_4{}^2-1\right)}+\\ +\dfrac{1}{\sqrt{3}\cdot\bar{h}_3}\cdot\left[\left(1+\dfrac{2\cdot\mu_s}{\sqrt{3}}\right)\cdot\left(\bar{R}_4-1\right)+\left(\dfrac{2\cdot\mu_s}{\sqrt{3}}\cdot\alpha^2+\left(1-\alpha\right)^2\right)\cdot\dfrac{4\cdot\bar{h}_3{}^2}{\left(\bar{R}_4{}^2-1\right)^2}\cdot\dfrac{\bar{R}_4{}^2-1}{3}\right].\end{array}\right] \quad (11)$$

For the convenience of analysis, we also introduce the parameter of the relative wall thickness of the hollow part s/h_3, where $s=R_4-R_3$.

For curvilinear triangle, the position of the triangle point B is optimized. The optimal value of the parameter α is found from the condition of the minimum reduced pressure $\bar{p}_5$ ($\partial\bar{p}_5/\partial\alpha$) in the form of calculation formula:

$$\alpha=\frac{\sqrt{3}}{2\cdot\left(\sqrt{3}+2\cdot\mu_s\right)}\cdot\left(2-\frac{3}{2}\cdot\bar{R}_3\cdot\frac{\bar{R}_4{}^2-\bar{R}_3{}^2}{\bar{R}_4{}^3-\bar{R}_3{}^3}\right). \quad (12)$$

The graphic representation of the expression for optimal value of the parameter α is shown in Fig. 4. It can be seen that in the range of 0.45...0.55, the parameter α has minimum value. But if we deviate from the optimal value upwards, for example, to values α = 0.9…0.8, then the pressure increasing is insignificant (see Fig. 4). The practical use of module 5 follows from this statement. It can be applied to other deformation schemes in which the outer border of the parabolic shape can be the surface of the forming tool.

Based on the results of the calculations, plots of the dependence of the reduced pressure vs the geometric parameters and friction conditions of the metal deformation process in the turn zone of the metal flow from the radial to the direct direction were plotted (Fig. 5–7).

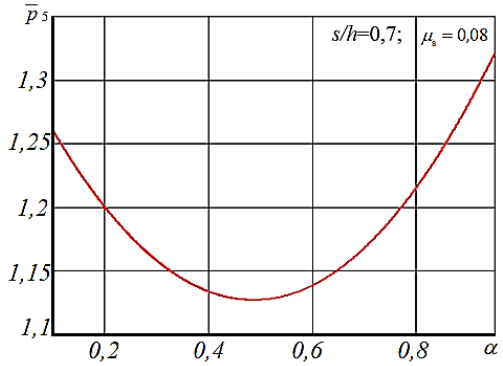


Fig. 4. Dependence of the reduced pressure vs the parameter α in the curvilinear turn module

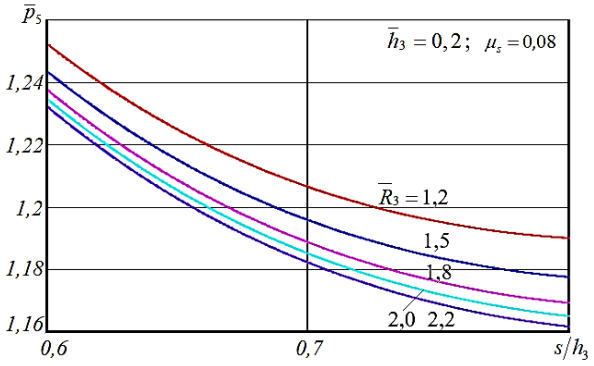


Fig. 5. Dependence of the reduced deformation pressure of the triangular module vs the relative parameter s/h_3

It has been established that the relative thickness of the flange $\bar{h}_3$, flange radius $\bar{R}_3$, parameter s/h_3, as well as the friction conditions expressed in terms of the friction coefficient μ have the greatest influence on the value of the reduced pressure $\bar{p}_5$. When decreasing the wall thickness of the tubular workpiece, the minimum values of the reduced pressure are characteristic of smaller values of the relative geometric parameter $\bar{h}_3$ (see Fig. 6).

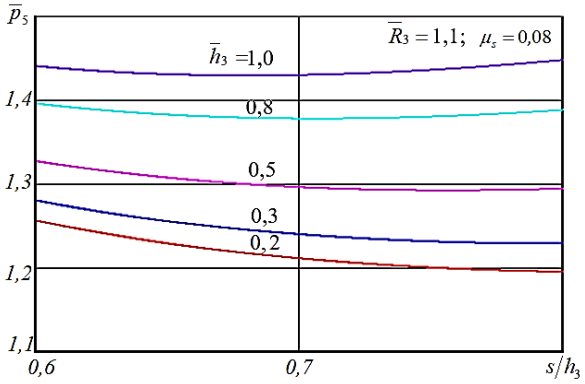


Fig. 6. Dependence of the reduced deformation pressure of the triangular module vs the relative parameter s/h_3 at variable height h_3

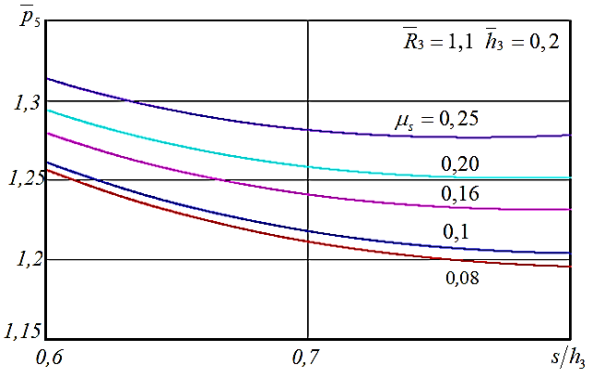


Fig. 7. Dependence of the reduced deformation pressure of the triangular module vs the relative parameter s/h_3 for different friction conditions

Reducing the relative radius of the flange $\bar{R}_3$ and increasing the friction coefficient μ leads to definite increasing the reduced flange extrusion pressure. With increasing the dimensionless geometric parameter $\bar{H}_1$, the reduced pressure increases intensively only at values of the friction coefficient close to the maximum (see Fig. 7).

Generalized calculation scheme for the process of sequential radial-forward extrusion with expansion with the curvilinear shape of kinematic module, close to the experimentally observed deformation field (the analysis of the flow picture was carried out according to installation experiments), are shown in Fig. 8.

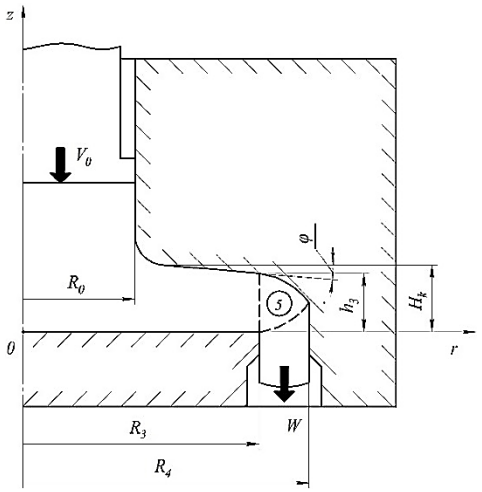
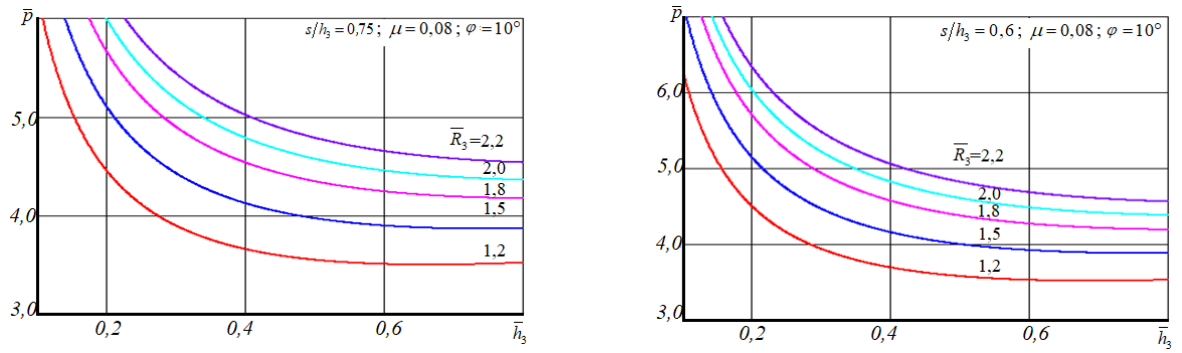


Fig. 8. Calculation scheme with curvilinear modules for the process of sequential radial-forward extrusion of hollow parts with flange of variable height

The analysis of the obtained dependence was carried out with the drawing plots shown in Fig. 9, in which such relative process parameters as the height h_3, the radius of the flange zone R_3 (the radius of the part cavity) and the ratio of the wall thickness of the part to the thickness of its bottom s/h are used as variables [16]. The effect of friction, as is known, is unambiguous; therefore, $\mu_s = 0.08$ was taken as the coefficient of friction, which is typical for cold extrusion processes.

If we consider the level of influence of the main parameters on the power mode of the process and the value of the reduced pressure, then we can see that the relative thickness of the wall of the hollow part s/h and the relative height of the flange cavity or, what is the same, thickness of the bottom of the part $\bar{h}$ have the greatest influence (see Fig. 9). On the effect in, the radius of the cavity of the part R_3 is in third place. In the general process at small values of h the effect is quite noticeable – the pressure $\bar{p}$ steadily increases with increasing $\bar{R}_3$. From the plots of the dependence of deformation pressures, taking into account s/h in the forward extrusion block (Fig. 10), it can be seen that the production of sleeve type parts with relatively thin walls requires significant energy values –up to $6{\cdot}\sigma_s$ and more [16]. The deformation pressure of combined extrusion is higher than the pressure of radial (centrifugal) extrusion by 1.5...2.1 times, depending on the size of the clearance for the forward flow of metal. But at $s/h = 0.5$ and more, the loads are quite acceptable. At the same time, the use of the optimal values of the specially introduced parameter α, which characterizes the geometry of the triangular module, makes it possible to prepare rational shape of the die and obtain significantly lower values of contact friction forces.



a *b*

Fig. 9. Dependence of the pressure of sequential combined extrusion vs the parameter $\bar{h}_3$ for different values of the relative cavity radius $\bar{R}_3$ at relative thickness $s/h_3 = 0.75$ (*a*) and $s/h_3 = 0.6$ (*b*)

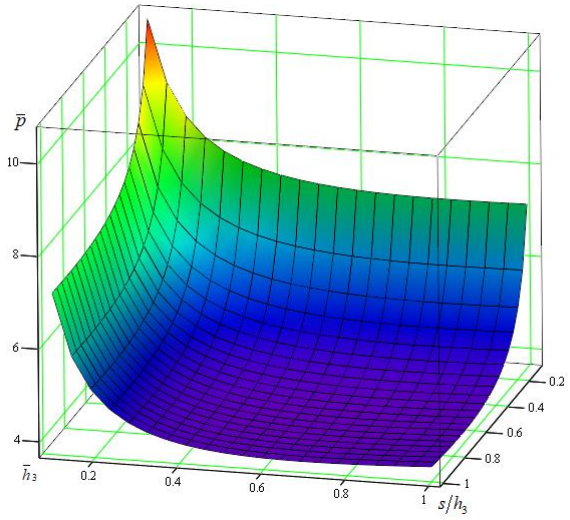


Fig. 10. Dependence of the pressure of sequential combined extrusion vs the relative wall thickness s/h_3 and the parameter $\bar{h}_3$ at $\mu_s = 0.08$; $\bar{R}_3 = 1.6$; $\varphi = 5°$

Thus, the developed module provides the possibility of simulating wide range of the processes with radial component of the metal flow.

CONCLUSIONS

It has been found that the velocity field containing curvilinear triangular kinematic elements better corresponds to the experimentally determined picture of radial extrusion deformations and metal flow kinematics and provides the lowest upper estimates of extrusion pressures. The simulations of the force regime and the analysis of the tool loads by the energy method of the upper estimate for radial-forward extrusion of hollow products with blind hole from continuous blanks using the developed curvilinear triangular kinematic module to describe the turn zone from the radial flow to the forward one were carried out. The kinematically possible velocity field for convex curvilinear (parabolic) triangular module and the equation for its inclined parabolic boundary are given. Analytical dependencies in parametric form are obtained for the powers of deformation forces, friction and shear on the boundaries of the module, as well as for pressure. For the parameter α, which characterizes the geometry of the module, optimization from the condition of the reduced pressure minimum was carried out and the analytical expression was obtained for its calculation. At the same time, the clarification of upper estimates of the axisymmetric deformation pressures due to their reduction is 18…30% compared to the known solutions based on axisymmetric modules with rectilinear contours. The nature of the influence of the main technological parameters (variable and constant value of the bottom thickness, cavity radius and part wall thickness) on the power mode of the process of sequential radial-forward extrusion of hollow parts is established. The deformation pressure during combined extrusion is higher than the pressure of radial (centrifugal) extrusion by 1.5...2.1 times, depending on the size of the clearance for the forward flow of metal. But at $s/h = 0.5$ and more, the loads are quite acceptable. At the same time, using the optimal values of the specially introduced parameter α, which characterizes the geometry of the triangular module, makes it possible to choose rational form of the die and obtain significantly lower values for contact friction forces.

REFERENCES

1. Unksov E.P., Johnson W., Kolmogorov V.L., Ogorodnikov V.A. Theory of Forging and Stamping. Moscow: Machine Building. 1992. 598 p. (*in Russian*).

2. Dmitriev A.M., Vorontsov A.L. Technology of forging and volume stamping. Part 1. Volumetric stamping by extrusion: tutorial for higher education institutions. Moscow: Mashinostroyeniye – 1. 2005. 500 p. (*in Russian*).

3. Aliiev I.S. Technological possibilities of new methods of combined extrusion. *Forging and stamping production*. 1990. 2, pp. 7–10. (*in Russian*).

4. Kalyuzhnyi V.L., Aliieva L.I., Kartamyshev D.A., Savchinskii I. G. Simulation of Cold Extrusion of Hollow Parts. *Metallurgist*. 2017. 61. 5-6, pp. 359–365. https://doi.org/10.1007/s11015-017-0501-1

5. Aliieva L.I. Improvement of combined extrusion processes: monograph. Kramatorsk: LLC "Edition -51". 2018. 352 p. ISBN 978-966-379-846-2. (*in Russian*).

6. Balendra R., Qin Y., Mater J. Research dedicated to the development of advanced metal-forming technologies. *Process. Technol*. 2004. 2, pp. 144–152.

7. Mletzko Ch., Liewald M., Felde A., Schiemann T. Napf–Fließpressen mit mehreren bewegten Werkzeugelementen zur Reduzierung der Stempelkraft. *Schmiede JOURNAL*. 2012. September p. 30–33.

8. Jafarzadeh H., Zadshakoyan M., Sobbouhi E. Abdi. Numerical studies of some important design factors in radial–forward extrusion process. *Materials and Manufacturing Processes.* 2010. 25, pp. 857–863.

9. Renne I.P., Sumarokova A.I. Technological possibilities of the process of free extrusion (without die) of hollow parts. *Forging and stamping production*. 1987. 6, pp. 25–26. (*in Russian*).

10. Aliiev I.S., Nosakov A.A., Makhmudov K.D. The method of kinematic modules for the analysis of processes of precise forging. *Improvement of processes and equipment of working by pressure in metallurgy and machine-building. Collection of scientific publications*. Kramatorsk: DSEA. 2001, pp. 142–146. (*in Russian*).

11. Hrudkina Natalia S., Aliieva Leila I. Modeling of cold extrusion processes using kinematic trapezoidal modules. *FME Transactions*. 2020. 48. 2. pp. 357–363. doi:10.5937/fme2002357H.

12. Aliieva L.I., Levchenko V.M., Kartamyshev D.O., Tagan L.V. Analysis of processes of transverse-longitudinal extrusion by the method of kinematic modules. *Proceedings of the 7th international scientific and practical conference "Modern technologies of the industrial complex – 2021"*, issue 7. Kherson: KHNTU. 2021, pp. 37–39. (*in Ukrainian*).

13. Aliieva L.I. Simulating of the combined extrusion process of flanges on hollow parts. *Bulletin of NTUU "KPI". "Mechanical Engineering" series*. 2016. 1(76), pp. 20–30. (*in Russian*).

14. Stepanskij L.G. Calculations of Metal Working Processes by Pressure. Moscow: Machine Building. 1982. 217 p. (*in Russian*).

15. Aliieva L.I., Kartamyshev D.A., Makhmudov K.D., Chuchin O. V. Power parameters of cold extrusion processes of hollow parts. Bulletin of NTU "KhPI". Kharkiv. 2018. 30 (1306), pp. 3–9. (*in Russian*).

16. Aliieva L.I., Levchenko V.M., Kartamyshev D.O., Malii Kh.V. Developing and using of kinematic modules for simulation of transverse-forwd extrusion processes. *Bulletin of KhNTU*. Kherson. 2021. 4 (79), pp. 11–22. (*in Ukrainian*).

Алієва Л. І., Левченко В. М., Алієв І. С., Картамишев Д. О. Розробка трикутного кінематичного модуля для розрахунку тиску деформування в процесах видавлювання

У роботі представлено розроблений на основі енергетичного методу верхньої оцінки універсальний кінематичний модуль, призначений для використання в математичних моделях комбінованих процесів холодного об'ємного штампування. Зокрема, цей модуль можна використовувати при моделюванні силового режиму та аналізі навантажень на інструмент при радіально-прямому видавлюванні порожнистих виробів з глухим отвором із суцільних заготовок для опису зон деформації при течії металу до центру та зон розвороту від радіальної течії до зворотної. Наведено кінематично можливе поле швидкостей для опуклого криволінійного (параболічного) трикутного модуля та рівняння його параболічної похилої межі. Отримано аналітичні залежності для потужностей сил деформування, тертя та зрізу на межах модуля, а також для наведеного тиску у параметричному вигляді. Розроблений криволінійний кінематичний модуль, застосування якого дозволяє підвищити оперативність методу верхньої оцінки для дослідження процесів комбінованого видавлювання, протестовано та описано. Показано, що на величину приведеного тиску для криволінійного модуля розвороту найбільший вплив мають відносні товщина фланця, його радіус, товщина стінки трубчастої заготовки, а також умови тертя. Продемонстровано можливість коректного використання криволінійного трикутного модуля для аналізу складних схем процесів із кількома зонами. Моделювання проведено для розрахункових схем радіально-прямого видавлювання заготовки зі змінною висотою фланця. Встановлено, що розроблений криволінійний трикутний модуль за рахунок зниження величини розриву швидкостей на його межах дозволяє знизити верхню оцінку навантажень на інструмент у порівнянні з варіантами моделей, які раніше базувалися на модулях прямокутної форми.

Ключові слова: *енергетичний метод верхньої оцінки, криволінійний кінематичний модуль, модульний підхід, радіально-пряме видавлювання, навантаження на інструмент, моделювання.*

Алиева Л. И., Левченко В. Н., Алиев И. С., Картамышев Д. А. Разработка треугольного кинематического модуля для расчета давления деформирования в процессах выдавливания

В работе представлен разработанный на основе энергетического метода верхней оценки универсальный кинематический модуль, предназначенный для использования в математических моделях комбинированных процессов холодной объемной штамповки. В частности, этот модуль можно использовать при моделировании силового режима и анализе нагрузок на инструмент при радиально-прямом выдавливании пустотелых изделий с глухим отверстием из сплошных заготовок для описания зон деформации при течении металла к центру и зон разворота от радиального течения к обратному. Приведены кинематически возможное поле скоростей для выпуклого криволинейного (параболического) треугольного модуля и уравнения его параболической наклонной границы. Получены аналитические зависимости для мощностей сил деформирования, трения и среза на границах модуля, а также для приведенного давления в параметрическом виде. Разработанный криволинейный кинематический модуль, применение которого позволяет повысить оперативность метода верхней оценки для

исследования процессов комбинированного выдавливания, протестирован и описан. Показано, что на величину приведенного давления для криволинейного модуля разворота наибольшее влияние оказывают относительные толщина фланца, его радиус, толщина стенки трубчатой заготовки, а также условия трения. Продемонстрирована возможность корректного использования криволинейного треугольного модуля для анализа сложных схем процессов с несколькими зонами. Моделирование проведено для расчетной схемы радиально-прямого выдавливания заготовки с переменной высотой фланца. Установлено, что разработанный криволинейный треугольный модуль за счет снижения величины разрыва скоростей на его границах позволяет снизить верхнюю оценку нагрузок на инструмент по сравнению с вариантами моделей, которые ранее базировались на модулях прямоугольной формы.

Ключевые слова: *энергетический метод верхней оценки, криволинейный кинематический модуль, модульный подход, радиально-прямое выдавливание, нагрузка на инструмент, моделирование.*

Aliieva Leila – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, professor of DSEA
Алієва Лейла Ігрaмотдіновна – д-р техн. наук, проф. ДДМА
Алиева Лейла Игрaмотдиновна – д-р техн. наук, проф. ДГМА
E-mail: leyliali2017@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5283-925X

Levchenko Volodymyr – Candidate of Technical Sciences, Junior Researcher of Ya. Usikov IRE of NASU
Левченко Володимир Миколайович – канд. техн. наук, мол. наук. співроб. IPE ім. О. Я. Усикова НАНУ
Левченко Владимир Николаевич – канд. техн. наук, мл. науч. сотр. ИРЭ им. А. Я. Усикова НАНУ
E-mail: goldangel271@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2411-4198

Aliiev Igramotdin – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Head of Metal forming Department of DSEA
Алієв Ігрaмотдін Сєражутдінович – д-р техн. наук, проф., зав. кафедрою ДДМА
Алиев Игрaмотдин Серажутдинович – д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой ДГМА
E-mail: igramaliev@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4248-8214

Kartamyshev Dmytro – Candidate of Technical Sciences, Assistant of DSEA
Картамишев Дмитро Олександрович – канд. техн. наук, асистент ДДМА
Картамышев Дмитрий Александрович – канд. техн. наук, асистент ДГМА
E-mail: dima_kartamyshev@ukr.net
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3240-8919

DSEA – Donbass State Engineering Academy, Kramatorsk
ДДМА – Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ
ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск

O. Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics of National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkiv
IPE ім. О. Я. Усикова НАНУ – Інститут радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАНУ, м. Харків
ИРЭ им. А. О. Усикова НАНУ – Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова Национальной академии наук Украины, г. Харьков

The article was received by the editors on 04.06.22.

УДК 621.73.06-52 DOI: 10.37142/2076-2151/2022-1(51)21

Бейгельзимер Э. Е.
Бейгельзимер Я. Е.

ПРОСТОЙ СПОСОБ ОЦЕНКИ ПРОИЗВОДНОЙ ЭМПИРИЧЕСКОЙ ФУНКЦИИ ПО ЕЕ ЗНАЧЕНИЯМ В НЕРАВНООТСТОЯЩИХ ТОЧКАХ

Предложена эвристическая формула 5-точечной аппроксимации первой производной неизвестной функции, значения которой измерены с погрешностью в неравноотстоящих точках. Расчет производной в данной точке выполняется по эффективным приращениям функции и аргумента, учитывающим разные весовые коэффициенты для ближних и удаленных точек измерений. Для определения рациональных значений весовых коэффициентов применено имитационное моделирование на тестовых функциях с известными производными. Детально описаны результаты моделирования на двух тестовых функциях, одна из которых имитирует процесс водяного охлаждения горячего стального листа, вторая – сложный колебательный процесс с переменной частотой и амплитудой. Установлено, что оптимальные значения весовых коэффициентов остаются примерно одинаковыми для существенно разных функций, что позволяет рекомендовать одну и ту же формулу для всех случаев. В отличие от классических методов численного дифференцирования функций, табулированных в неравноотстоящих узлах, предложенная формула одновременно учитывает сглаживание эмпирических данных. Показано, что это существенно повышает точность численной оценки производной даже в тех случаях, когда случайная погрешность измерения функции составляет весьма малую величину, - от ± 1 %. Полученная формула рекомендуется к использованию при решении любых задач ОМД, требующих оценки производной эмпирической функции, в том числе при расчете напряженно-деформированного состояния металла, описании тепловых процессов, определении теплофизических свойств материалов.

***Ключевые слова**: математическое моделирование, производная табулированной функции, неравноотстоящие узлы, погрешность измерений, сглаживание эмпирических данных.*

В практике инженерных исследований часто возникает необходимость оценить первую производную некоторой неизвестной функции, которая табулирована в неравномерно распределенных эмпирических точках. Например, такая задача возникает при определении напряженно-деформированного состояния металла в процессах обработки давлением [1; 2], при оценке теплового потока на основе значений температуры, измеренной в разные моменты времени [3-6], при расчете дифференциальных показателей свойств материалов после оцифровки графиков соответствующих интегральных характеристик, измеренных экспериментально [7-9]. Для решения таких задач обычно применяют один из двух подходов.

Первый подход заключается в аппроксимации эмпирических данных аналитической функцией, а затем вычислении производной этой функции, используя методы аналитического дифференцирования. Однако во многих случаях удовлетворительно описать эмпирические данные аналитической функцией невозможно, по крайней мере, в широком интервале изменения аргумента. Поэтому описанный выше подход к поиску производной часто не может быть реализован на практике.

Второй подход заключается в нахождении конечно-разностной производной с использованием методов численного дифференцирования [10; 11, с. 433, 450]. Одним из наиболее распространенных способов численного дифференцирования при неравноотстоящих узлах является использование интерполяционных полиномов Лагранжа. Например, при оценке первой производной функции по трем точкам используется следующее выражение:

$$(y_i')_{3uL} = y_{i-1}\frac{X_{i,i+1}}{X_{i-1,i}X_{i-1,i+1}} + y_i\frac{X_{i,i-1}+X_{i,i+1}}{X_{i,i-1}X_{i,i+1}} + y_{i+1}\frac{X_{i,i-1}}{X_{i+1,i-1}X_{i+1,i}} \quad (1)$$

где y_i' – оценка первой производной исследуемой (y) в i-й точке массива данных; $X_{j,k}$ – интервальная разность аргумента:

$$X_{j,k} = x_j - x_k \quad (2)$$

x и y с подстрочными индексами – измеренные значения аргумента и функции в соответствующих точках (например, $X_{i,i+1} = x_i - x_{i+1}$).

Подстрочные индексы в обозначении первой производной в левой части означают, что оценка этой производной выполнена по трем (3) неравноотстоящим (u от англ. «unequally») точкам с использованием интерполяционных полиномов Лагранжа (L).

Для уточнения результата используют более трех эмпирических точек. Например, формула для 5-точечной численной оценки первой производной в случае неравных интервалов между точками выглядит следующим образом [12]:

$$(y_i')_{5uL} = D_{i-2} + D_{i-1} + D_i + D_{i+1} + D_{i+2} \tag{3}$$

где

$$D_{i-2} = y_{i-2}\frac{X_{i,i-1}X_{i+1,i}X_{i+2,i}}{X_{i-2,i-1}X_{i-2,i}X_{i-2,i+1}X_{i-2,i+2}} \tag{4}$$

$$D_{i-1} = y_{i-1}\frac{X_{i,i-2}X_{i+1,i}X_{i+2,i}}{X_{i-1,i-2}X_{i-1,i}X_{i-1,i+1}X_{i-1,i+2}} \tag{5}$$

$$D_i = y_i\frac{\left(X_{i,i-1}+X_{i,i-2}\right)X_{i+1,i}X_{i+2,i} - X_{i,i-2}X_{i,i-1}\left(X_{i+1,i}+X_{i+2,i}\right)}{X_{i,i-2}X_{i,i-1}X_{i,i+1}X_{i,i+2}} \tag{6}$$

$$D_{i+1} = y_{i+1}\frac{X_{i,i-2}X_{i-1,i}X_{i+2,i}}{X_{i+1,i-2}X_{i+1,i-1}X_{i+1,i}X_{i+1,i+2}} \tag{7}$$

$$D_{i+2} = y_{i+2}\frac{X_{i,i-2}X_{i-1,i}X_{i+1,i}}{X_{i+2,i-2}X_{i+2,i-1}X_{i+2,i}X_{i+2,i+1}} \tag{8}$$

остальные обозначения – те же, что и в формулах (1) и (2).

Приведенные выше конечно-разностные формулы для вычисления $(y_i')_{3uL}$ и $(y_i')_{5uL}$ в случае анализа эмпирических данных имеют один принципиальный недостаток. Он заключается в том, что производная вычисляется по полиномам, которые проходят через табулированные значения функции. Хорошо известно, что любая экспериментально найденная функция всегда имеет некоторую погрешность в своих значениях, которая может очень сильно сказываться на величине ее производной. По этой причине, численное дифференцирование должно быть сопряжено со сглаживанием экспериментальных данных. В работе [13, с. 327] приведены формулы для дифференцирования эмпирически определенных функций с одновременным сглаживанием, но они пригодны лишь для равноотстоящих значений аргумента и для достаточно плавно меняющейся функции (вторая производная которой близка к нулю).

Целью работы является поиск эффективного способа оценки производной эмпирической функции в условиях двух обстоятельств: 1) неравные интервалы между точками измерения функции и 2) погрешность самих измеренных значений функции.

В качестве такого эффективного способа авторы предлагают простую формулу 5-точечной аппроксимации первой производной функции в *i*-той точке:

$$(y_i')_{5uS} = \frac{Y_{i+2,i-2} + nY_{i+1,i-1}}{X_{i+2,i-2} + nX_{i+1,i-1}} \tag{9}$$

где $Y_{j,k}$ – интервальная разность измеренных значений y:

$$Y_{j,k} = y_j - y_k \tag{10}$$

например, $Y_{i+2,i-2} = y_{i+2} - y_{i-2}$; n – весовой коэффициент, определяющий степень влияния ближайших точек (x_{i-1} and x_{i+1}) относительно дальних (x_{i-2} and x_{i+2}). Подстрочные индексы 5uS в обозначении производной в левой части выражения (9) означают, что оценка производится по пяти (5) неравноотстоящим (u) точкам по простой (S от англ. «Simple») формуле.

Формула (9) не имеет строгого обоснования и является эвристической. Выражения в ее числителе и знаменателе представляют собой некоторые эффективные значения приращения функции и приращения ее аргумента. Коэффициент n учитывает разный «вес» приращений, связанных с разным расстоянием точек от той точки, где вычисляется производная. Ниже будет показано, что для достаточно различных функций, хорошие результаты дает одно и то же значение n. Для определения рациональных значений весового коэффициента n авторы применили имитационное моделирование на тестовых функциях с известными производными.

В качестве одной из таких тестовых функций использована функция следующего вида:

$$y(x) = a_1 \text{arcctg}(x - a_2) \tag{11}$$

с теоретической первой производной:

$$y'(x) \equiv \frac{dy(x)}{dx} = -\frac{a_1}{1 + (x - a_2)^2} \tag{12}$$

где a_1 и a_2 – постоянные параметры.

Итак, предположим, что мы экспериментально исследуем некоторый физический процесс, который на самом деле подчиняется закону тестовой функции (11). Например, это может быть процесс водяного охлаждения стального листа после нагрева или прокатки (см., например, [14]). В этом случае x может обозначать время [с], а y – температуру [°С]. Сама функция (11) неизвестна, и мы оцениваем ее, измеряя в эксперименте значения y при некоторых дискретных значениях x. Вопрос состоит в том, насколько точно мы можем оценить производную (12) (в нашем примере эта производная означает скорость охлаждения) по формуле (9) и какое значение весового коэффициента n обеспечит наиболее точное соответствие?

При ответе на этот вопрос примем во внимание, что измерения температуры выполняются с некоторыми погрешностями. Чтобы учесть это, при имитационном моделировании каждое «измеренное» значение связали с истинной температурой следующей зависимостью:

$$y_i = y(x_i)(1 + 2(\delta_i - 0{,}5)\varepsilon) \tag{13}$$

где y_i – результат измерений неизвестной температуры $y(x)$ в i-й момент времени x_i; δ_i – равномерно распределенное случайное число от 0 до 1; ε – односторонний предел ошибки измерений в долях единицы ($0 < \varepsilon < 1{,}0$).

Учитывая, что моменты времени дискретных измерений могут быть распределены неравномерно, при имитационном моделировании шаг между соседними значениями аргумента приняли как случайно распределенную величину:

$$h_i = h_m(1 + 2(\rho_i - 0{,}5)\Delta) \tag{14}$$

где h_i – шаг между двумя соседними значениями аргумента (h-шаг), т.е. $h_i = x_i - x_{i-1}$; h_m – базовое (среднее) значение h-шага; ρ_i – равномерно распределенное случайное число от 0 до 1; Δ – односторонний предел относительной вариации h-шага в долях единицы ($0 < \Delta < 1{,}0$).

На рис. 1 показан пример одной реализации ("прогона") имитационной модели ускоренного охлаждения стального листа, которое гипотетически подчиняется функции (11). Изменение температуры во времени показано на рис. 1а, а изменение скорости охлаждения во времени - на рис. 1б. Значения параметров a_1, a_2, ε, h_m и Δ приведены в подписи к рис. 1.

Степень соответствия между конечно-разностной и теоретической производной оценивали по величине их частного относительного отклонения в каждой i-той точке:

$$r_i = \frac{y_i' - y'(x_i)}{y'(x_i)} \cdot 100\% \tag{15}$$

Используя значения r_i, полученные в одном прогоне имитационной модели для всех i, рассчитали частоту попадания r_i в определенный симметричный карман $\pm R\%$ (например, ± 25 % или ± 50 % и т. д.) в данном прогоне. Усреднив эти частоты по большому числу (N)

прогонов, вычислили статистическую вероятность P_R того, что конечно-разностная производная (9) отклонится от истинной (теоретической) производной (12) не более чем на заданное значение ± R %. Ниже по тексту Параметр R будем называть *односторонним полем отклонений*, а вероятность P_R – *обеспеченностью* поля отклонений R.

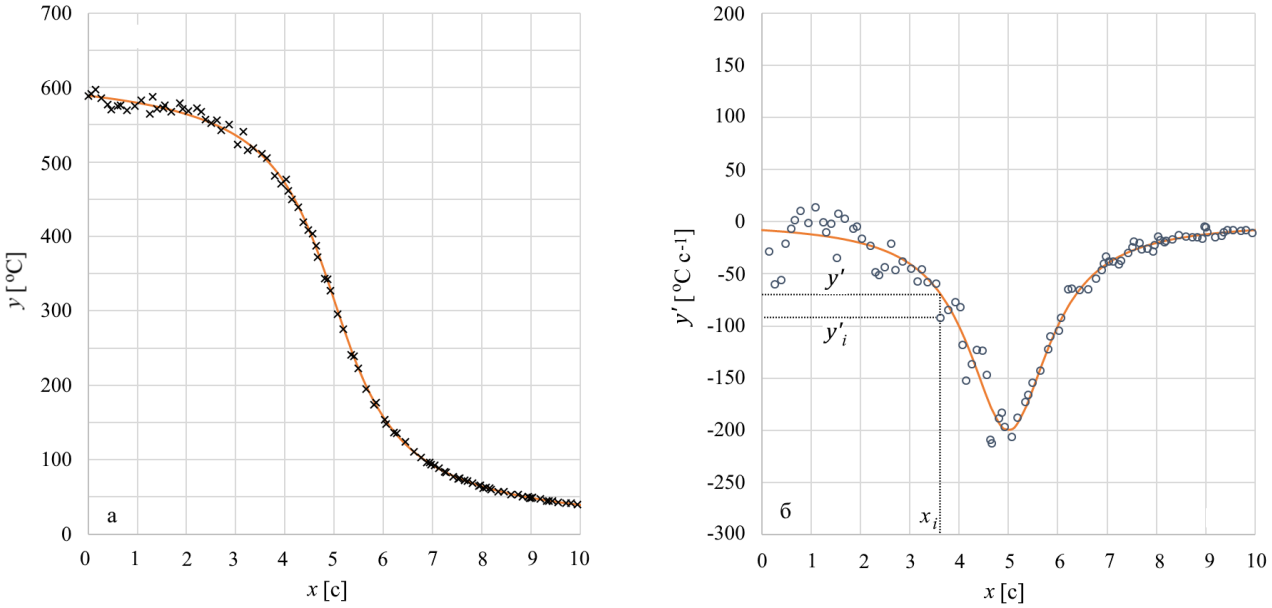


Рис. 1. Пример одной реализации («прогона») имитационной модели ускоренного охлаждения стального листа, подчиняющегося функции (11) с параметрами a_1 = 200 °С и a_2 = 5 с:

а – данные температуры: сплошная линия – график функции $y(x)$ в соответствии с (11), точки – гипотетические эмпирические данные y_i, рассчитанные по формуле (13) с $\varepsilon = 0{,}025$, т. е. полученные со случайными отклонениями в пределах ± 2,5 % от графика $y(x)$, в неравноотстоящих точках по времени x_i с базовым шагом $h_m = 0{,}1$ с и пределом относительной вариации от него $\Delta = 0{,}75$; б – первая производная температуры по времени: сплошная линия – график функции $y'(x)$ согласно (12), точки –оценка по формуле (9) при $n = 0{,}75$.

Это поясняется на рис. 2, где показана выборочная функция распределения r_i и обеспеченность P_R для примера, показанного на рис. 1. Статистические характеристики, показанные на рис. 2, получены при трех различных значениях весового коэффициента в формуле (9): n = 0, n = 0,75 и n = 4. Например, если конечно-разностная производная по этой формуле рассчитывается при n = 0,75, то 81 % всех значений r_i меньше (+ 25)% и 19 % всех значений r_i меньше (-25) % (см. рис. 2а). Соответственно, 62% от всех значений r_i попадает в область ± %, т.е. обеспеченность поля отклонений ±25% составляет $P_{25} = 62\%$ (см. рис. 2б). При других значениях весового коэффициента обеспеченность P_{25} имеет меньшую величину: $P_{25} = 60$ % и $P_{25} = 52$ % при n = 0 и n = 4 соответственно.

Аналогичные вычисления были проведены для других тестовых функций и параметров дискретизации ε, h_m и Δ в формулах (13)–(14). Некоторые результаты показаны на рис. 3, где представлена зависимость обеспеченности P_R от весового коэффициента n. Сплошные линии на этих графиках относятся к функции (11), а пунктирные - к другой тестовой функции, моделирующей довольно сложную зависимость (рис. 4):

$$y(x) = c_1 x^3 + c_2 x \cdot \sin(c_3 x) \tag{16}$$

с быстро меняющейся производной:

$$y'(x) \equiv \frac{dy(x)}{dx} = 3c_1 x^2 + c_2 c_3 x \cdot \cos(c_3 x) + c_2 \cdot \sin(c_3 x) \tag{17}$$

где c_1 c_2 и c_3 – постоянные параметры.

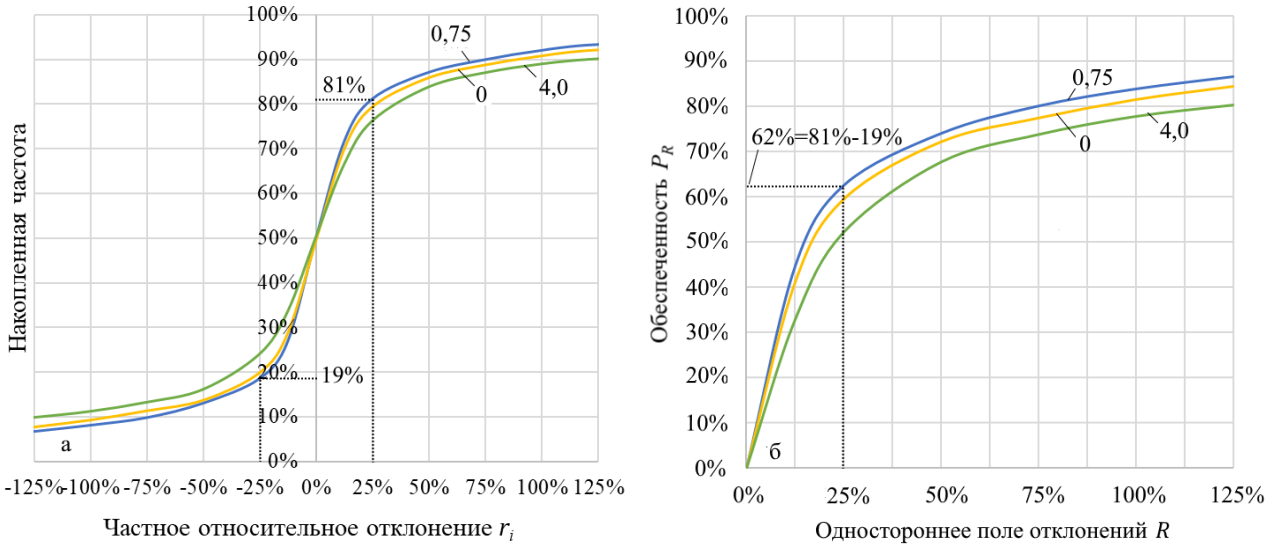


Рис. 2. Статистические характеристики распределения величины частного относительного отклонения в условиях примера, показанного на рис. 1 в выборке из 50 прогонов (N = 50):

а – функция распределения частного относительного отклонения r_i; б – статистическая вероятность P_R того, что это отклонение r_i попадет в определенный симметричный карман ± R % (обеспеченность поля отклонений R). Числа у кривых означают значение весового коэффициента n в формуле (9).

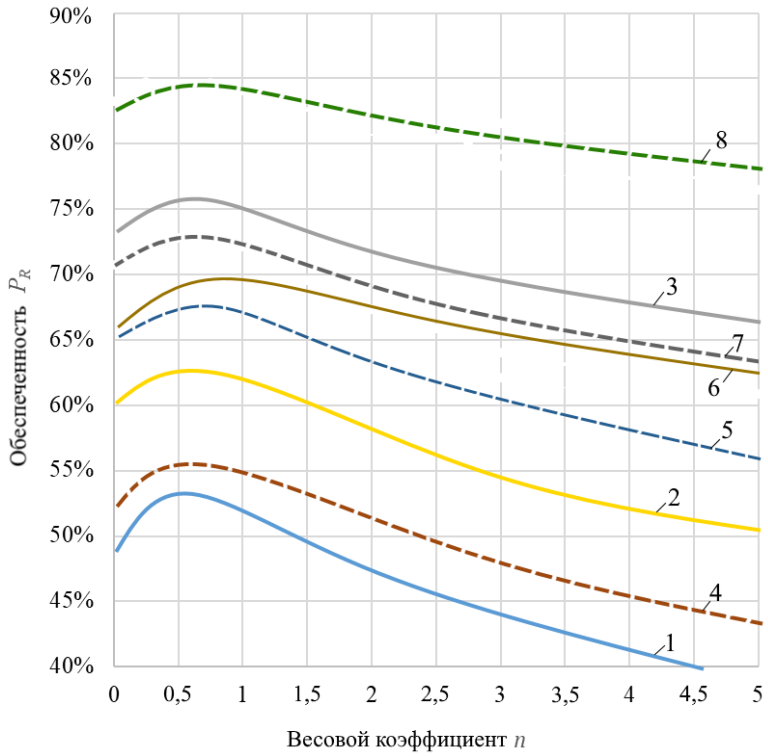


Рис. 3. Зависимость обеспеченности P_R от весового коэффициента n, полученная при имитационном моделировании процессов, подчиняющихся функции (11) с параметрами a_1 = 200 и a_2 =5 (кривые 1-3) и функции (16) с c_1 =0,05, c_2 = 4 и c_3=1,5 (кривые 4-8). Кривые относятся к разным значениям предельной ошибки измерений ε и параметров дискретизации в формулах (13)-(14), а также ширины поля отклонений R: 1 – ε = 0,075, h_m = 0,1, Δ = 0,75; R = ± 50 %; 2 – ε = 0,025, h_m = 0,1, Δ = 0,75; R= ± 25 %; 3 – ε = 0,025, h_m = 0,2, Δ = 0,75; R= ±25%; 4 – ε = 0,05, h_m = 0,15, Δ = 0,75; R= ± 25 %; 5 - ε = 0,075, h_m = 0,2, Δ = 0,75; R= ± 50 %; 6 - ε = 0,025, h_m = 0,2, Δ = 0,75; R= ±25 %; 7 – ε = 0,05, h_m = 0,15, Δ = 0,75; R= ±50 %; 8 – ε = 0,05, h_m = 0,2, Δ = 0,75; R= ± 50 %

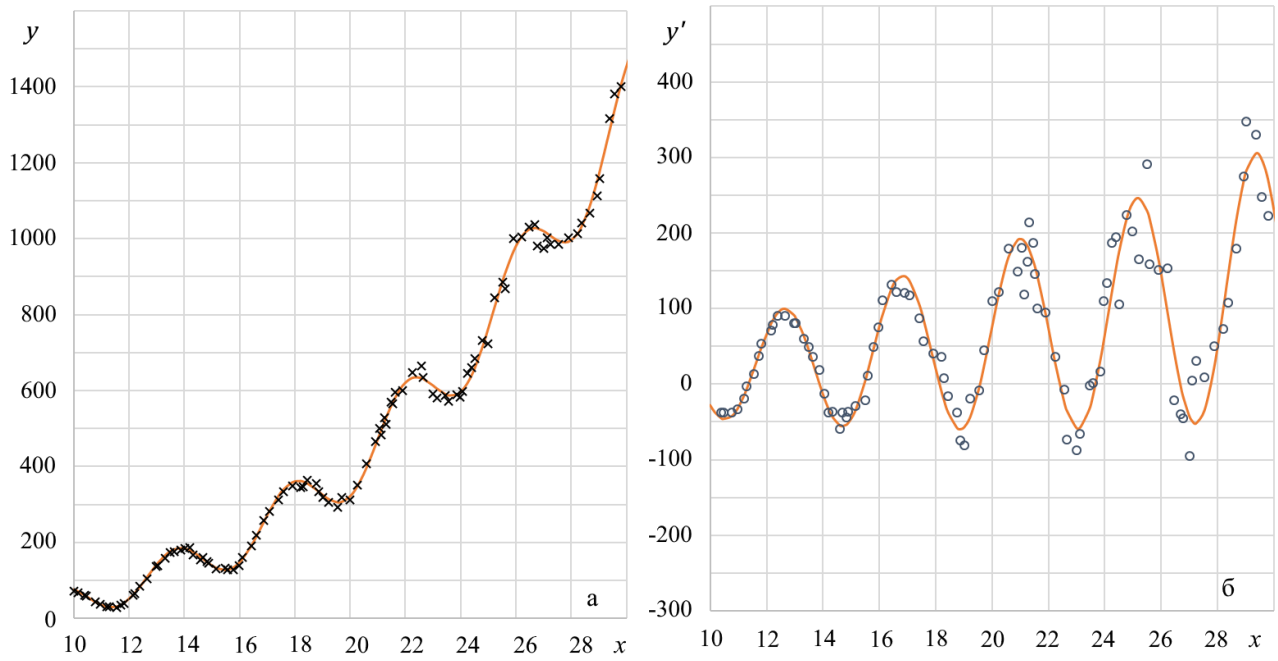


Рис. 4. Пример одной реализации («прогона») моделирования процесса, подчиняющегося функции (16) с параметрами $c_1 = 0{,}05$, $c_2 = 4$ и $c_3 = 1.5$:

а – данные по зависимой переменной y: сплошная линия – график функции $y(x)$ в соответствии с (16), точки – гипотетические эмпирические значения y_i рассчитанные по формуле (13) с $\varepsilon = 0{,}05$, т.е. полученные со случайными отклонениями в пределах ±5 % от графика $y(x)$, в неравноотстоящих точках по времени x_i с базовым значением шага $h_m = 0{,}2$ и пределом его относительной вариации $\Delta = 0{,}75$; б – первая производная функции: сплошная линия – график функции $y'(x)$ согласно (17), точки – конечно-разностные оценки первой производной по формуле (9) при $n = 0.75$

Полученные данные показывают, что если предел случайной ошибки измерений функции составляет ± 2 % и более (т.е. $\varepsilon \geq 2$ %) для совершенно различных функций и разных параметров дискретизации (h_m, Δ) оптимальные значения весового коэффициента n находятся в узком диапазоне: примерно от 0,5 до 0,75. При значениях n внутри этого диапазона достигается наилучшее соответствие между конечно-разностными по формуле (9) и теоретическими значениями первой производной. Здесь отметим, что при n = 0,5 и равном шаге между точками, т.е. при $h_i = \text{const} \equiv h$, формула (9) становится идентичной выражению, приведенному в работе [13, с. 328].

Принимая $n = 2/3$ в формуле (9) как значение в середине оптимального диапазона 0,5…0,75, мы получили итоговый вид простой инженерной формулы для аппроксимации первой производной при анализе неравномерно распределенных эмпирических данных с ошибками:

$$(y_i')_{5uS} = \frac{3y_{i+2} + 2y_{i+1} - 2y_{i-1} - 3y_{i-2}}{3x_{i+2} + 2x_{i+1} - 2x_{i-1} - 3x_{i-2}} \qquad (18)$$

На рис. 5 показаны результаты расчетов по формуле (18) в сравнении с результатами по формулам (1) и (3). Видно, что при малейших погрешностях измерений функции предложенная инженерная формула дает существенно более точные результаты благодаря тому, что она одновременно учитывает сглаживание эмпирических данных. Например, согласно рис. 5, а, если предел погрешности измерений функции (11) составляет ± 2,5 %, то при оценке первой производной по формуле (18) обеспеченность поля отклонений ± 25 % составит выше 60 %, тогда как при оценкам по формулам (1) и (3) – ниже 30 %.

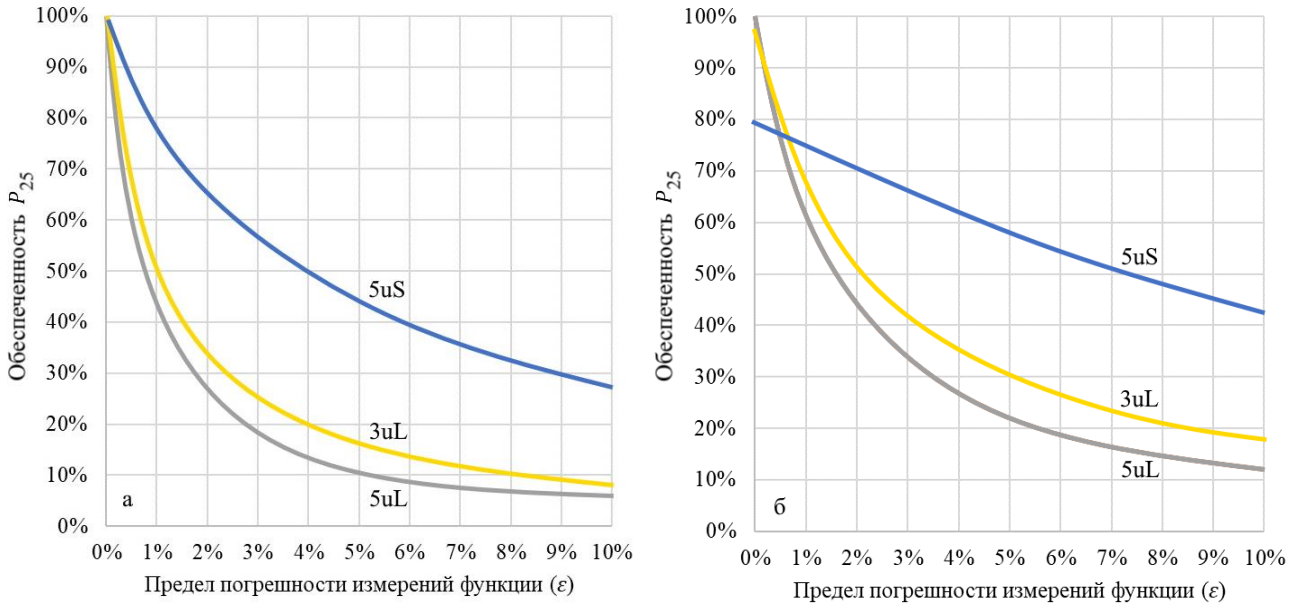


Рис. 5. Обеспеченность поля отклонений ± 25 % от истинных значений первой производной неизвестной функции в случаях расчета по эмпирическим данным с ошибками: 3uL – по формуле (1), 5uL – по формуле (3), 5uS – по формуле авторов (18):

а – имитационное моделирование на тестовой функции (11) с параметрами $a_1 = 200$; $a_2 = 5$; $h_m = 0{,}1$; $\Delta = 0{,}75$; б – имитационное моделирование на тестовой функции (16) с параметрами $c_1 = 0{,}05$; $c_2 = 4$; $c_3 = 1.5$; $h_m = 0{,}2$; $\Delta = 0{,}75$

ВЫВОДЫ

Использование в самых разных задачах ОМД известных формул для оценки производной неизвестной функции по ее значениям, измеренным в дискретных точках, приводит к ошибкам. Объясняется это тем, что такие формулы либо учитывают неравные интервалы между точками измерений, но не учитывают погрешность самих измерений, либо наоборот, учитывают возможную погрешность измерений, но не учитывают неравномерность расположения точек измерений.

Авторами предложена эвристическая формула (18), которая учитывает одновременно оба фактора, присущих для любой табулированной эмпирической функции: 1) неравноотстоящие значения аргумента и 2) погрешность измеренных значений.

Результаты имитационного моделирования на различных тестовых функциях показывают, что даже при небольшой случайной погрешности измерений (от ± 1 %) формула (18) позволяет кардинально повысить точность оценки первой производной эмпирической функции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дель Г.Д., Новиков Н.А. Метод делительных сеток. Москва: Машиностроение. 1979. 144 с.

2. Tu Sh., Ren X., He J., Zhang Zh. Stress–strain curves of metallic materials and post-necking strain hardening characterization: A review. *Fatigue Fract Eng Mater Struct*. 2020. 43. pp. 3–19. https://doi.org/10.1111/ffe.13134

3. Klinzing W.P., Rozzi J.C., Mudawar I. Film and Transition Boiling Correlations for Quenching of Hot Surfaces with Water Sprays. *J. Heat Transfer*. 1992. 9. pp. 91–103. DOI: https://doi.org/10.1007/BF02833145

4. Kotrbáček P., Chabičovský M., Kominek J., Resl O., Bellerova H. Influence of water temperature on spray cooling at high surface temperatures. *Applied Thermal Engineering*. 2022. 216. 119074. DOI: https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119074

5. Kotrbacek P., Bellerova H., Luks T., Raudensky M. Heat Transfer Correlations for Secondary Cooling in Continuous Casting. *Steel Research Int*. 2020. 2000465. DOI: https://doi.org/10.1002/srin.202000465

6. Wendelstorf J., Wendelstorf R., Spitzer K.-H. Spray Cooling Heat Transfer and Calculation of Water Impact Density for Cooling of Steel Sheet Materials by Inverse Process Modelling: *Steel Res. Int*. 2009. 9 (80). pp. 639–644. DOI: https://doi.org/10.2374/SRI09SP054

7. Beygelzimer E., Beygelzimer Y. Generalized estimates for thermal expansion of oxide scale in the range from 0 ºC to 1300 ºC with account for movability of phase transitions in its component. 2021. https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/2110/2110.08528.pdf

8. Beygelzimer E., Beygelzimer Y. Heat capacity of oxide scale in the range from 0 °C to 1300 °C: Generalized estimates with account for movability of phase transitions. 2021. https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/2110/2110.11101.pdf

9. Bharadwaj R., Sarkar A., Rakshe B. Effect of Cooling Rate on Phase Transformation Kinetics and Microstructure of Nb–Ti Microalloyed Low Carbon HSLA Steel. *Metallogr. Microstruct. Anal.* 2022. DOI: https://doi.org/10.1007/s13632-022-00864-9

10. Лященко М.Я., Головань М.С. Чисельні методи. Київ: Либідь. 1996. 287 с.

11. Ram Babu Saksena. Engineering Mathematics III: For UPTU. India: Pearson Education. 2010. 556 p.

12. Singh Ashok K., Bhadauria B.S. Finite Difference Formulae for Unequal Sub-Intervals Using Lagrange's Interpolation Formula. *Int. J. Math. Anal.* 2009. 3 (17). pp. 815–827.

13. Ланцош К. Практические методы прикладного анализа. Москва: Государственное издательство физико-математической литературы. 1961. 524 с.

14. Остапенко А.Л., Бейгельзимер Э.Е., Козленко Д.А., Гриценко С.А., Гончаров Н.В. Экспериментальная оценка охлаждения листа при обработке в роликовой закалочной машине. *Сталь*. 2016. 5. С. 29–34.

REFERENCES

1. Del G.D., Novikov N.A. Dividing grid method. Moscow: Mechanical engineering. 1979. 144 p. *(in Russian).*

2. Tu Sh., Ren X., He J., Zhang Zh. Stress–strain curves of metallic materials and post-necking strain hardening characterization: A review. Fatigue Fract Eng Mater Struct. 2020. 43. pp. 3–19. https://doi.org/10.1111/ffe.13134

3. Klinzing W.P., Rozzi J.C., Mudawar I. Film and Transition Boiling Correlations for Quenching of Hot Surfaces with Water Sprays. *J. Heat Transfer*. 1992. 9. pp. 91-103. DOI: https://doi.org/10.1007/BF02833145

4. Kotrbáček P., Chabičovský M., Kominek J., Resl O., Bellerova H. Influence of water temperature on spray cooling at high surface temperatures. Applied Thermal Engineering. 2022, 216, 119074. DOI: https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119074

5. Kotrbacek P., Bellerova H., Luks T., Raudensky M. Heat Transfer Correlations for Secondary Cooling in Continuous Casting. *Steel Research Int.* 2020. 2000465. DOI: https://doi.org/10.1002/srin.202000465

6. Wendelstorf J., Wendelstorf R., Spitzer K.-H. Spray Cooling Heat Transfer and Calculation of Water Impact Density for Cooling of Steel Sheet Materials by Inverse Process Modelling: *Steel Res. Int.* 2009. 9 (80). pp. 639-644. DOI: https://doi.org/10.2374/SRI09SP054

7. Beygelzimer E., Beygelzimer Y. Generalized estimates for thermal expansion of oxide scale in the range from 0 ºC to 1300 ºC with account for movability of phase transitions in its component. 2021. https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/2110/2110.08528.pdf

8. Beygelzimer E., Beygelzimer Y. Heat capacity of oxide scale in the range from 0 °C to 1300 °C: Generalized estimates with account for movability of phase transitions. 2021. https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/2110/2110.11101.pdf

9. Bharadwaj R., Sarkar A., Rakshe B. Effect of Cooling Rate on Phase Transformation Kinetics and Microstructure of Nb–Ti Microalloyed Low Carbon HSLA Steel. *Metallogr. Microstruct. Anal.* 2022. DOI: https://doi.org/10.1007/s13632-022-00864-9

10. Lyaschenko M.Ya., Golovan M.S. Numerical Methods. Kyiv: Lybid. 1996. 287 p.

11. Ram Babu Saksena. Engineering Mathematics III: For UPTU. India: Pearson Education. 2010. 556 p.

12. Singh Ashok K., Bhadauria B.S. Finite Difference Formulae for Unequal Sub-Intervals Using Lagrange's Interpolation Formula. *Int. J. Math. Anal.* 2009. 3 (17). pp. 815–827.

13. Lanczos C. Applied Analysis. Moscow: State Publishing House of Physical and Mathematical Literature. 1961. 524 p. *(in Russian).*

14. Ostapenko A.L.; Beygelzimer E.E.; Kozlenko D.A.; Gritsenko S.A.; Goncharov N.V. Sheet cooling in a roller quenching machine. Steel Transl. 2016. 46. pp. 349–355. DOI: https://doi.org/10.3103/S0967091216050119

Beygelzimer E., Beygelzimer Y. A simple way to estimate the derivative of an empirical function by its values at unequally spaced points

A heuristic formula for 5-point approximation of the first derivative of an unknown function whose values are measured with an error at unequally spaced points is proposed. The derivative at a given point is calculated using the effective increments of the function and argument, taking into account the different weight coefficients for near and far measurement points. Simulation modeling on test functions with known derivatives is applied to determine rational values of weight coefficients. The results of simulation on two test functions are described in detail, one of which simulates the process of water cooling of a hot steel sheet, the second is a complex oscillatory process with variable frequency and amplitude. It is found that the optimal values of weight coefficients remain approximately the same for significantly different functions, which allows us to recommend the same formula for all cases. In contrast to classical methods of numerical differentiation of functions tabulated at unequally spaced nodes, the proposed formula simultaneously takes into account the smoothing of empirical data. It is shown that this significantly increases the accuracy of the numerical estimate of the derivative even in cases where the random error of the function is a very small value, from ± 1 %. The obtained formula is recommended for use in any plastic forming problems that require the estimation of the derivative of

an empirical function, including the calculation of the stress-strain state of metal, the description of thermal processes, the determination of the thermophysical properties of materials, etc.

Keywords: mathematical modeling, derivative of tabulated function, unequally spaced nodes, measurement error, smoothing of empirical data.

Бейгельзімер Е. Ю., Бейгельзімер Я. Ю. Простий спосіб оцінки похідної емпіричної функції за її значеннями в нерівно відстаючих точках

Запропоновано евристичну формулу 5-точкової апроксимації першої похідної невідомої функції, значення якої вимірено з похибкою в нерівно відстаючих точках. Розрахунок похідної в даній точці виконується за ефективними приростами функції та аргументу, що враховують різні вагові коефіцієнти для ближніх і віддалених точок вимірювань. Для визначення раціональних значень вагових коефіцієнтів застосовано імітаційне моделювання на тестових функціях із відомими похідними. Детально описані результати моделювання на двох тестових функціях, одна з яких імітує процес водяного охолодження гарячого сталевого листа, друга – складний коливальний процес із змінною частотою та амплітудою. Встановлено, що оптимальні значення вагових коефіцієнтів залишаються приблизно однаковими для суттєво різних функцій, що дозволяє рекомендувати одну й ту саму формулу для всіх випадків. На відміну від класичних методів чисельного диференціювання функцій, табульованих у нерівновіддалених вузлах, запропонована формула одночасно враховує згладжування емпіричних даних. Показано, що це суттєво підвищує точність чисельної оцінки похідної навіть у випадках, коли випадкова похибка вимірювання функції становить дуже малу величину, - від ± 1%. Отримана формула рекомендується до використання при вирішенні будь-яких задач ОМД, що вимагають оцінки похідної емпіричної функції, у тому числі при розрахунку напружено-деформованого стану металу, опису теплових процесів, визначенні теплофізичних властивостей матеріалів.

Ключові слова: математичне моделювання, похідна табульованої функції, нерівно відстаючі вузли, похибка вимірювань, згладжування емпіричних даних.

Бейгельзимер Эммануил Ефимович – канд. техн. наук, ООО «ОМД-инжиниринг», г. Днепр
Beygelzimer Emmanuil – Candidate of Technical Sciences, OMD-engineering LLC, Dnipro
Бейгельзімер Емануїл Юхимович – канд. техн. наук, ТОВ «ОМД-инжиніринг», Дніпро
E-mail: emmanuilomd@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0838-7249

Бейгельзимер Ян Ефимович – д-р техн. наук, проф. ДонФТИ им. А. А. Галкина НАН Украины, г. Киев
Beygelzimer Yan – Doctor of Technical Sciences, Professor DonFTI named after O. O. Galkin National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv
Бейгельзімер Ян Юхимович – д-р техн. наук, проф., доц. ДонНТУ. ім. О. О. Галкіна НАН України, м. Київ
E-mail: yanbeygel@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1321-8565

ДонФТИ – Донецкий физико-технический институт им. А. А. Галкина НАН Украины, г. Киев, Украина
DonFTI – Donetsk Institute For Physics And Engineering named after O.O. Galkin National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine
ДонНТУ – Донецький фізико-технічний інститут ім. О. О. Галкіна НАН України, м. Київ, Україна

Статья поступила в редакцию 10.05.22 г.

УДК 621.7.011 DOI: 10.37142/2076-2151/2022-1(51)30

Грушко О. В.
Кириця І. Ю.

КРИТЕРІЇ ДЕФОРМОВНОСТІ З ВРАХУВАННЯМ ВЛАСТИВОСТЕЙ МАТЕРІАЛУ В ПАРАМЕТРІ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ

Немонотонність поведінки пластичності матеріалів в області додатних гідростатичних тисків залежно від класичного показника напруженого стану призводить до необхідності пошуку більш вдалих параметрів в якості аргументу діаграми пластичності. В роботі запропоновано параметр напруженого стану, який залежить від фізико-механічних властивостей матеріалу. Коефіцієнти впливу є механічними властивостями матеріалу. Діаграму пластичності в карті металу, за допомогою введеного параметра напруженого стану, пропонується апроксимувати монотонно спадаючою експоненціальною функцією. Встановлено, що вплив головних нормальних напружень є неоднаковим щодо накопичення пошкоджень в матеріалі, який пластично деформується. Причому, даний вплив залежить від виду матеріалу, що дає можливості формування моделі пластичності, зокрема для матеріалів з різною реологією. Встановлено, що коефіцієнт впливу третього відносного головного напруження для маловуглецевих сталей, алюмінієвих та титанових сплавів становить – 0,76… 0,85.

Рекомендовано в відомих моделях деформовності застосовувати в якості аргументу діаграми пластичності запропонований нами параметр напруженого стану, оскільки фізичного змісту накопичення пошкоджень даний параметр не змінює. Область застосування того чи іншого критерію залишається у відповідності з рекомендаціями його використання в залежності від виду процесу і історії навантаження. Виконано порівняльний розрахунок використаного ресурсу пластичності за відомими критеріями та критеріями, які враховують властивості матеріалу через параметр напруженого стану. Використання діаграми пластичності, побудованої за допомогою запропонованого параметра напруженого стану, для процесів холодного пластичного деформування, які протікають в області додатного гідростатичного тиску, залежно від виду шляху деформування та особливостей реології металу уточнює значення використаного ресурсу пластичності металу до 2-х разів, що дозволяє зменшити кількість браку виробів до 50 % для процесів, режими яких пораховані за граничними деформаціями.

Ключові слова: *холодне пластичне деформування, пластичність, параметр напруженого стану, діаграма пластичності, критерії деформовності, використаний ресурс пластичності.*

В основі сучасної теорії деформовності лежить гіпотеза про залежність пластичності від схеми напруженого стану, яка описується діаграмою пластичності. Діаграми пластичності в більшості теорій описують експериментальну залежність граничної деформації e_p від показника жорсткості напруженого стану η.

В останніх роботах Г. Д. Деля, В. А. Огороднікова, А. А. Богатова, Ю. Г. Важенцева, С. В. Смірнова показано, що залежність пластичності від схеми напруженого стану характеризується, як мінімум, двома показниками напруженого стану [1–6]. В. А. Огороднiков вважав, що при об'ємному напруженому стані необхідно враховувати вплив на пластичність третього інваріанта тензора напружень [1, 5]. Такий підхід дозволив отримати позитивні результати при розробці ряду процесів обробки тиском, які реалізуються в умовах об'ємного напруженого стану [7, 8].

Для оцінки деформовності заготовок і для технологічного забезпечення якості готових виробів необхідна інформація про історію деформування кожної матеріальної частинки в об'ємі заготовки.

Із результатів досліджень останніх років витікає, що при об'ємному напруженому стані, а також в деяких випадках плоского напруженого стану, значення граничної деформації e_p виявляються різними для схем, які характеризуються одним і тим же значенням показника напруженого стану η.

Вважається, що пластичність металу достатньо добре описується показником η при його від'ємних значеннях. Однак, в додатній області, для пластичних металів, спостерігається немонотонність залежності пластичності від η. Часто деформації при розтягу перевищують деформацію зсуву; при двовісному розтягу пластичність співмірна з деформацією одновісного розтягу, а при плоскому деформованому стані може бути найменшою з відмічених [1-6]. Тобто

функція, що описує пластичність за допомогою даного показника буде немонотонна, що вносить невизначеність при апроксимації і екстраполяції експериментальних даних. Пошук зручного показника (параметра) і функції діаграми пластичності, що відповідають умовам монотонності, нульовій пластичності при рівномірному тривісному розтягу і задовільній кореляції з експериментальними даними до цих пір є дискусійним питанням. Не виключено, що універсальний показник напруженого стану, інваріантний по відношенню до механічних властивостей матеріалу може взагалі не існувати, чи, зокрема, бути однаковим лише для вибраної групи матеріалів (наприклад, сталь, алюмінієві сплави і т. д.) [2–4]. На існування такого параметру вказують роботи Г. Д. Деля [3, 4]. Тобто для кожного матеріалу, власне кажучи, може бути свій параметр, від якого залежить його пластичність.

В роботі запропоновано підхід, який створюватиме перспективи щодо побудови діаграми пластичності з використанням нового параметра напруженого стану ζ. Даний параметр використовується в якості аргументу діаграми пластичності

$$\zeta = \frac{k_1\sigma_1 + k_2\sigma_2 + k_3\sigma_3}{\sigma_i} = k_1\overline{\sigma}_1 + k_2\overline{\sigma}_1 + k_3\overline{\sigma}_1 \tag{1}$$

де $\overline{\sigma}_1 = \frac{\sigma_1}{\sigma_i}$, $\overline{\sigma}_2 = \frac{\sigma_2}{\sigma_i}$, $\overline{\sigma}_3 = \frac{\sigma_3}{\sigma_i}$ – відносні головні напруження;

k_1, k_2, k_3 – коефіцієнти впливу відносного головного напруження на пластичність металу.

Базуючись на дослідженням проведених в роботах [9, 10] встановлено, що вплив головних нормальних напружень є неоднаковим щодо накопичення пошкоджень в матеріалі, який пластично деформується. Причому, даний вплив залежить від виду матеріалу, що дає можливості формування моделі пластичності, зокрема для матеріалів з різною реологією.

Діаграма пластичності $e_p(\zeta)$ описується експоненціальними функціями і має суттєво кращу кореляцію з експериментом, ніж традиційна діаграма пластичності.

$$e_p = d \cdot \exp(-q \cdot \zeta) = d \cdot \exp\left(-q \cdot \left(\overline{\sigma}_1 + \overline{k_2}\overline{\sigma}_2 + \overline{k_3}\overline{\sigma}_3\right)\right), \tag{2}$$

де $\overline{k_2} = \frac{k_2}{k_1}$, $\overline{k_3} = \frac{k_3}{k_1}$ – коефіцієнти впливу відносного головного напруження, які виражені в частках стосовно коефіцієнта k_1 першого головного напруження σ_1.

Незручність використання параметра ζ полягає в його унікальності для кожного матеріалу, що робить неможливим порівняння діаграм $e_p(\zeta)$ для різних металів на одному рисунку, на відміну відзвичайної діаграми пластичності.

Використання запропонованого параметра напруженого стану ζ і відповідної апроксимації (2) в відомих моделях руйнування полягає в тому, що замість традиційної функції діаграми пластичності $e_p(\eta)$ слід застосовувати функцію діаграми $e_p(\zeta)$, оскільки фізичного змісту накопичення пошкоджень параметр ζ не змінює. Область застосування того чи іншого критерія залишається у відповідності з рекомендаціями його використання в залежності від виду процесу і історії навантаження.

Таким чином, аналітичні залежності розрахунку використаного ресурсу пластичності і критерії руйнування запишуться з урахуванням $e_p(\zeta)$ наступним чином (звернемо увагу тільки на деформаційні критерії). Відомі та скореговані критерії наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Відомі та скореговані деформаційні критерії

Відомі деформаційні критерії	Скореговані деформаційні критерії
Критерій Г. А. Смірнова-Аляєва [1]: $$\Psi = \frac{e_i}{e_p(\eta)} \le 1 \quad (3)$$	$$\Psi_\zeta = \frac{e_i^*}{e_p(\varsigma)} < 1 \quad (6)$$
Критерій В. Л. Колмогорова [1]: $$\Psi = \int_0^{e_p^*} \frac{de_i}{e_p(e_i)} \le 1 \quad (4)$$	$$\Psi_\zeta = \int_0^{e_i^*} \frac{de_i}{e_p(\varsigma)} < 1 \quad (7)$$
Критерій В. А. Огороднікова, Г. Д. Деля, В. Г. Нахайчука [2, 6]: $$\Psi = \int_0^{e_i} \left(1 + 0.2 \cdot arctg \frac{d\eta}{de_i}\right) \cdot \frac{e_i^{0.2 \cdot arctg \frac{d\eta}{de_i}}}{\left[e_p(\eta(e_i))\right]^{1+0.2 \cdot arctg \frac{d\eta}{de_i}}} de_i \le 1 \quad (5)$$	$$\Psi_\zeta = \int_0^{e_i^*} (1 + 0.2 \cdot f) \cdot \frac{e_i^{0.2 \cdot f}}{\left[e_p(\varsigma)\right]^{1+0.2 \cdot f}} de_i < 1 \quad (8)$$

Залежність, що отримана на основі тензорного критерію А. А. Ільюшіна, Г. Д. Деля [2]:

$$d\psi_{ij} = \sqrt{\frac{2}{3}}(1 - a + 2a\varphi)\frac{d\varepsilon_{ij}^p}{e_p(\varsigma)},$$

$$\Psi_\zeta = \frac{a - 1 + \sqrt{(1-a)^2 + 4a\sqrt{\psi_{ij}\psi_{ij}}}}{2a} < 1. \quad (9)$$

Покажемо використання критерію тензорної моделі нелінійного накопичення пошкоджень:

за Делем Г. Д. [2] $$\Psi_{ij} = \int_0^{e_i} \left(1 - a + 2a\frac{e_i}{e_p(\zeta)}\right)\beta_{ij}\frac{de_i}{e_p(\zeta)}, , \quad (10)$$

де $\beta_{ij} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{d\varepsilon_{ij}}{de_i}$ – направляючий тензор швидкостей деформацій, $a = const$, з урахуванням запропонованого параметра ζ для прогнозування залишкової пластичності металу заготовки.

В свою чергу умова руйнування запишеться у вигляді:

$$\Psi_{ij} \cdot \Psi_{ij} = 1. \quad (11)$$

Направляючий тензор швидкостей деформацій β_{ij} варто поставити в залежність від параметра ζ:

$$\beta_{ij} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{d\varepsilon_{ij}}{de_i} = f_{ij}(\zeta), \quad (12)$$

де $f_{ij}(\zeta)$ – функція, що пов'язує історію навантаження з параметром ζ .

Залежність $f_{ij}(\zeta)$ може бути розрахована з використанням ЕОМ за напружено-деформованим станом.

Далі необхідно підставити вираз (12) у (10) і отримати компоненти тензора пошкоджень $\Psi_{ij}\Psi_{ij}$. Остаточно, залишкова пластичність у довільному напрямку при розтягуванні зразка, вирізаного з деформованої деталі, може бути оцінена за формулою (13)

$$\frac{e_{p11}}{e_p} = -\frac{1}{2} - \frac{e_i^*}{e_p} + \sqrt{\left(\frac{1}{2} + \frac{e_i^*}{e_p}\right)^2 - \sqrt{6}\,\Psi_{11} + \sqrt{6\Psi_{11}{}^2 + 4\left(1 - \Psi_{ij}\,\Psi_{ij}\right)}}, \quad (13)$$

де e_i^* – накопичена деформація при формоутворенні заготовки;

$e_p = e_p(\zeta = 1)$ – пластичність металу при $\zeta = 1$; e_{p11} – залишкова пластичність при розтягуванні в напрямку x_1.

Порівняння розрахунків використаного ресурсу пластичності.

Виконаємо розрахунок використаного ресурсу пластичності для низки шляхів деформування (рис. 1) для алюмінієвого сплаву АД33Т1. В якості розрахункових критеріїв використаємо залежності (3) і (6), (4) і (7), (5) і (8).

Розрахунок використаного ресурсу пластичності за критеріями (3), (4), (5 (Ψ_η)) [11] виконаємо з використанням апроксимації діаграми пластичності за В. А. Огородніковим [6]

$$e_p = e_{p0}\exp(-\lambda_{1,2}\eta), \quad (14)$$

де e_{p0} – пластичність металу при зсуві; $\lambda_{1,2}$ – чутливість пластичності металу до зміни схеми напруженого стану (λ_1 при $0 \le \eta \le 2$ и λ_2 при $-2 \le \eta \le 0$). А розрахунок використаного ресурсу пластичності за критеріями (6) – (8) (Ψ_ζ) – з використанням апроксимації (2).

Розбіжності у розрахунках визначимо по відношенню до Ψ_ζ у вигляді:

$$\Delta = \frac{\Psi_\zeta - \Psi_\eta}{\Psi_\zeta} 100\% \cdot \tag{15}$$

Результати розрахунків зведено до таблиці 2.

Таблиця 2

Порівняння розрахунків використаного ресурсу пластичності

Шляхи деформування на рис. 1	Розрахунки використаного ресурсу пластичності та похибок								
	Ψ_η (3)	Ψ_ζ (6)	Δ, % (15)	Ψ_η (4)	Ψ_ζ (7)	Δ, % (15)	Ψ_η (5)	Ψ_ζ (8)	Δ, % (15)
1	0,92	0,57	–61	0,85	0,64	–33	0,96	0,68	–41
2	1,26	0,56	–125	0,92	0,87	–5,7	1,1	0,85	–29
3	1,19	0,73	–63	1,19	0,73	–63	1,19	0,73	–63
4	1	1	0	1	1	0	1	1	0
5	0,5	0,68	26	0,5	0,68	26	0,5	0,68	26
6	1	1	0	1	1	0	1	1	0
7	1,69	0,73	–131	1,69	0,73	–131	1,69	0,73	–131

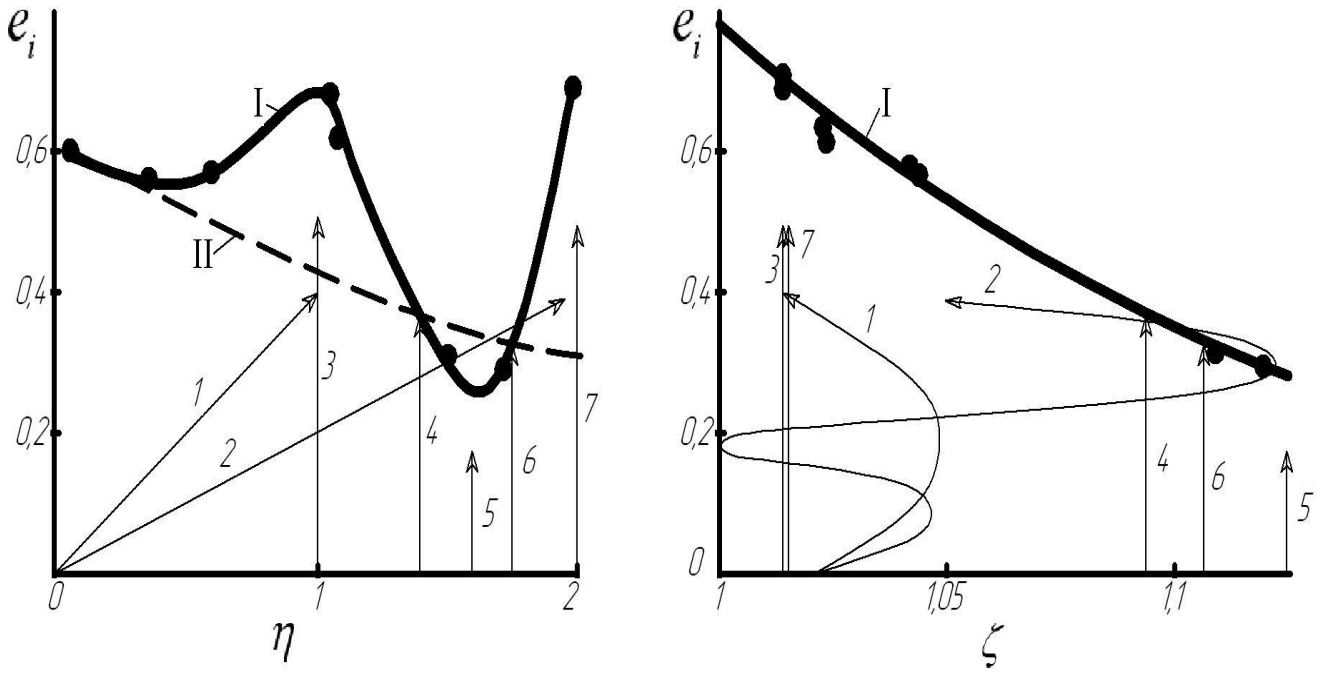


Рис. 1. Діаграми пластичності алюмінієвого сплаву 6061 (АД33Т1) і шляхи деформування в координатах аргументу η і ζ ($\bar{k}_2 = -0,063$, $\bar{k}_3 = -0,761$):

I – діаграма пластичності – апроксимація (2);

II – діаграма пластичності – апроксимація (11); 1–7 – шляхи деформування

При простих шляхах деформування використання моделей, побудованих на основі показника η та параметра ζ, дає розрахунок однакових значень використаного ресурсу пластичності у точках перетину діаграм пластичності та відповідних шляхів деформування (див. рис. 1, графіки 4, 6). Розрахунок використаного ресурсу пластичності при простих шляхах деформування з використанням аргументу η для сплаву АД33Т1 може як суттєво занижувати дійсні значення Ψ_η (див. рис. 1, графіки 3, 7), так і завищувати їх (див. рис. 1, графік 5).

Для дослідженого матеріалу параметр ζ змінюється у досить вузькому діапазоні від 1 до 1,2; отже, похідна, що характеризує історію деформування $d\zeta / de_i$, буде близька до нуля та її впливом при оцінці деформовності можна знехтувати. Це підтверджує розрахунок використаного ресурсу пластичності за критерієм, що не враховує історію (7) та враховує її (8). Так, для шляхів 1, 2 значення Ψ_ζ за (7) і (8) відрізняються несуттєво (див. табл. 2).

ВИСНОВКИ

Використання діаграми пластичності у вигляді залежності граничної деформації від параметру напруженого стану у відомих деформаційних критеріях для процесів, що протікають в області додатних гідростатичних тисків, може суттєво уточнити розрахунок використаного ресурсу пластичності – до 2-х разів, що, у свою чергу, дозволяє знизити ймовірність руйнування (до 50 %) в процесах холодного пластичного деформування (ХПД), параметри яких розраховані з мінімальними запасами за деформаціями руйнування, та розширити технологічні можливості процесів обробки металів тиском. Запропоновану апроксимацію у вигляді залежності граничної деформації від параметру напруженого стану рекомендується використовувати для оцінки деформовності матеріалу в процесах холодного листового штампування.

Зазначимо, що для перевірки та калібрування моделі використовувалися переважно дані для плоского та частково для вісесиметричного напруженого стану. При об'ємному напруженому стані перевірка вимагає проведення спеціальних експериментів у камері високого тиску. У цьому випадку об'ємність схеми можна врахувати показником, що містить третій інваріант тензора напружень [5].

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Огородников В. А. Оценка деформируемости металлов при обработке давлением. Киев : Вища школа. Головное изд-во. 1983. 175 с.

2. Дель Г. Д. Технологическая механика. Москва : Машиностроение. 1978. 174 с.

3. Del G. D., Ogorodnikov V. A., Spiridonov L. K. Plasticity of metal subjected to complex loading. *Izv. Uchebn. Zaved. Mashinostroenie*. 1974. 12. pp. 22–26.

4. Dell H., Gese H., Oberhofer G. Crach FEM–A comprehensive approach for the prediction of sheet metal failure. *AIP Conference Proceedings*. 2007. 908. May 17, pp. 165–170.

5. Огороднiков В. А., Кириця І. Ю., Перлов В. Є. Механіка процесів холодного пластичного деформування вісесиметричних заготовок з глухим отвором: монографія. Вінниця: ВНТУ. 2015. 164 с.

6. Огородников В. А., Киселев В. Б., Сивак И. О. Энергия. Деформация. Разрушение (задачи автотехнической экспертизы): монографія. Вінниця: УНІВЕРСУМ. 2005. 204 с.

7. Грушко О. В., Гуцалюк О. В.Моделювання напруженого стану в процесах осесиметричного пластичного деформування із врахуванням карти матеріалів. *Обработка материалов давлением* : сб. науч. тр. Краматорск : ДГМА. 2020. 1(50). С. 18-23.

8. Огородников В. А., Кирица И. Ю. Оценка деформируемости металла при формировании внутренних шлицевых поверхностей в глухих отверстиях методом холодного пластического деформирования. *Обработка материалов давлением* : сб. науч. тр. Краматорск : ДГМА. 2020. 1(50). С. 136–146.

9. Грушко А. В. Параметр напряженного состояния, учитывающий свойства материала, и его влияние на пластичность. *Вісник Національного технічного університету України «КПІ»*. Серія машинобудування. 2012. 64. С. 220–226.

10. Грушко А. В. Карты материалов в холодной обработке давлением : монография. Винница : ВНТУ. 2015. 348 с.

11. Кириця І. Ю. Феноменологічні критерії руйнування. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2022. 3. С. 75–81.

REFERENCES

1. Ogorodnikov V. A. Evaluation of the deformability of metals during pressure treatment. Kyiv : Higher school. Head publishing house. 1983. 175 p. *(in Russian)*

2. Del G. D. Technological mechanics. Moscow : Mechanical engineering. 1978. 174 p. *(in Russian)*

3. Del G. D., Ogorodnikov V. A., Spiridonov L. K. Plasticity of metal subjected to complex loading. *Izv. Uchebn. Zaved. Mashinostroenie*. 1974. 12. pp. 22–26.

4. Dell H., Gese H., Oberhofer G. Crach FEM–A comprehensive approach for the prediction of sheet metal failure. *AIP Conference Proceedings*. 2007. 908. May 17, pp. 165–170.

5. Ogorodnikov V.A., Kyrytsia I.Yu., Perlov V.Ye. Mechanics of processes of cold plastic deformation of axisymmetric workpieces with a blind hole: monograph. Vinnytsia: VNTU. 2015. 164 p. (*in Ukrainian).*

6. Ogorodnikov V. A., Kiselev V. B., Sivak I. O. Energy. Deformation. Destruction (tasks of autotechnical expertise): monograph. Vinnitsa: UNIVERSUM. 2005. 204 p. *(in Russian)*

7. Hrushko O.V., Gutsalyuk O.V. Modeling of the stress state in the processes of axisymmetric plastic deformation taking into account the material map. *Materials working by pressure*. Kramatorsk: DSEA. 2020. 1(50), pp. 18–23. (*in Ukrainian).*

8. Ogorodnikov V. A., Kyrytsia I. Yu. Estimation of deformability of metal during the formation of internal slotted surfaces in blind holes by the method of cold plastic deformation. *Materials working by pressure*. Kramatorsk: DSEA. 2020. 1(50), pp. 136–146. *(in Russian)*

9. Grushko A. V. Parameter of the stress state, taking into account the properties of the material, and its influence on plasticity. *Journal of Mechanical Engineering NTUU "KPI"*. 2012. 64, pp. 220-226. *(in Russian)*

10. Grushko A.V. Maps of materials in cold forming: monograph. Vinnitsa : VNTU. 2015. 348 p. *(in Russian).*

11. Kyrytsia I.Yu. Phenomenological criteria of destruction. *Herald of the Khmelnytskyi National University*. 2022. 3, pp. 75–81. (*in Ukrainian).*

Hrushko O., Kyrytsia I. Criteria of deformity taking into account the properties of the material in the parameter of the stress state

The non-monotonic behavior of the plasticity of materials in the area of positive hydrostatic pressure depending on the classical indicator of the stress state leads to the need to find better parameters as an argument of the plasticity diagram. In this article, parameter of the stress state is proposed, which depends on the physical and mechanical properties of the material. Influence coefficients are mechanical properties of the material. The plasticity diagram in the metal map, with the help of the entered stress state parameter, is proposed to be approximated by a monotonically decreasing exponential function. It was established that the influence of the principal normal stresses is unequal in relation to the accumulation of damage in the plastically deformed material. Moreover, this influence depends on the type of material, which makes it possible to form a plasticity model, in particular for materials with different rheology. It was established that the influence factor of the third relative principal stress for low-carbon steels, aluminum and titanium alloys is 0,76...0,85.

It is recommended to use the parameter of the stress state proposed by us as an argument of the plasticity diagram in known models of deformability, since this parameter does not change the physical content of damage accumulation. The scope of application of this or that criterion remains in accordance with the recommendations for its use, depending on the type of process and load history. A comparative calculation of the used plasticity resource was performed according to known criteria and criteria that take into account the properties of the material through the stress state parameter. The use of a plasticity diagram constructed using the proposed stress state parameter for cold plastic deformation processes that occur in the region of positive hydrostatic pressure, depending on the type of deformation path and the features of metal rheology, clarifies the value of the used metal plasticity resource up to 2 times, which allows to reduce the number of defective products up to 50% for processes whose regimes are calculated by limit deformations.

Keywords: *cold plastic deformation, plasticity, stress state parameter, plasticity diagram, deformability criteria, used plasticity resource.*

Грушко А. В., Кирица И. Ю. Критерии деформируемости с учетом свойств материала в параметре напряженного состояния

Немонотонность поведения пластичности материалов в области положительных гидростатических давлений в зависимости от классического показателя напряженного состояния приводит к необходимости поиска более удачных параметров в качестве аргумента диаграммы пластичности. В данной работе предложен параметр напряженного состояния, зависящий от физико-механических свойств материала. Коэффициенты влияния являются механическими свойствами материала. Диаграмму пластичности в карте металла с помощью введенного параметра напряженного состояния предлагается аппроксимировать монотонно убывающей экспоненциальной функцией. Установлено, что влияние главных нормальных напряжений неодинаково относительно накопления повреждений в пластически деформируемом материале. Причем, данное влияние зависит от вида материала, что дает возможности формирования модели пластичности, в частности для материалов с разной реологией. Установлено, что коэффициент влияния третьего относительного главного напряжения для малоуглеродистых сталей, алюминиевых и титановых сплавов составляет – 0,76…0,85.

Рекомендуется в известных моделях деформируемости применять в качестве аргумента диаграммы пластичности предложенный нами параметр напряженного состояния, поскольку физического смысла накопления повреждений данный параметр не изменяет. Область применения того или иного критерия остается в соответствии с рекомендациями использования в зависимости от вида процесса и истории нагружения. Выполнен сравнительный расчет использованного ресурса пластичности по известным критериям и критериям, учитывающим свойства материала через параметр напряженного состояния. Использование диаграммы пластичности, построенной с помощью предложенного показателя напряженного состояния, для процессов холодного пластического деформирования, протекающих в области положительного гидростатического давления, в зависимости от вида пути деформирования и особенностей реологии металла уточняет значение использованного ресурса пластичности металла до 2-х раз, что позволяет уменьшить количество брака изделий до 50 % для процессов, режимы которых рассчитаны по предельным деформациям.

Ключевые слова: *холодное пластическое деформирование, пластичность, параметр напряженного состояния, диаграмма пластичности, критерии деформируемости, использованный ресурс пластичности.*

Грушко Олександр Володимирович – д-р техн. наук, проф. ВНТУ
Hrushko Oleksandr – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, VNTU
Грушко Александр Владимирович – д-р техн. наук, проф. ВНТУ
E-mail: grushko1alex@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5551-375X

Кириця Інна Юріївна – канд. техн. наук, доц. ВНТУ
Kyrytsia Inna – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, VNTU
Кирица Инна Юрьевна – канд. техн. наук, доц. ВНТУ
E-mail: kyrytsya@vntu.edu.ua
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8280-5552

ВНТУ – Винницкий национальный технический университет, г. Винница
ВНТУ – Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця
VNTU – Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia

Стаття надійшла до редакції 10.04.22 р.

УДК 621.777.4 DOI: 10.37142/2076-2151/2022-1(51)38

Грудкіна Н. С.
Левченко В. М.
Абхарі П.
Коцюбівська К. І.
Малій Х. В.

ОСОБЛИВОСТІ ПРОЕКТУВАННЯ ПРОЦЕСІВ ТОЧНОГО ОБ'ЄМНОГО ШТАМПУВАННЯ ВИДАВЛЮВАННЯМ НА ОСНОВІ ЕНЕРГЕТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ РОЗРАХУНКУ

В роботі продемонстровано можливості ефективного застосування енергетичного методу балансу потужностей при проектуванні процесів точного об'ємного штампування видавлюванням. Проведено класифікацію кінематичних модулів за основними характеристиками, що підвищує оперативність їх використання на етапі побудови розрахункових схем процесів. Надано рекомендації з раціонального застосування уніфікованих кінематичних модулів з урахуванням обмежень їх комбінування із суміжними кінематичними модулями, можливостей варіювання форми межі та розташування відносно осі симетрії. Розширено базу уніфікованих кінематичних модулів трапецеїдальної і трикутної форми та надано рекомендації з огляду на раціональність і обмеження їх використання при побудові розрахункових схем процесів із врахуванням оперативної зміни конфігурації інструменту (наявності або відсутності фаски та заокруглення). Це забезпечило можливості оперативного керування формоутворенням складнопрофільованих деталей у процесах суміщеного комбінованого видавлювання з декількома ступенями свободи течії металу, що проходять в саморегульованому режимі. Розроблено програмний модуль з систематизації бази уніфікованих кінематичних модулів, складових їх розрахунку і рекомендацій із застосування та комплексу енергетичних розрахункових моделей процесів точного об'ємного штампування видавлюванням із прогнозування силового режиму та формоутворення деталі. Окреслено перспективні напрямки удосконалення проектування процесів точного об'ємного штампування видавлюванням на основі енергетичних моделей розрахунку, що сприятиме впровадженню процесів суміщеного комбінованого видавлювання на виробництві.

Ключові слова: *точне об'ємне штампування, суміщене комбіноване видавлювання, кінематичний модуль, енергетичний метод балансу потужностей, проектування, розрахункова модель.*

Процеси поперечного и комбінованого видавлювання з одним або декількома ступенями свободи течії на даний час відносять до перспективних ресурсозберігаючих технологій з огляду на збільшення обсягів виробництва точних заготовок та неперервне розширення номенклатури штампованих деталей та матеріалів [1–4]. Однак впровадження процесів комбінованого видавлювання з декількома ступенями свободи течії на виробництві вимагає наявності попередньої достовірної оцінки силового режиму, деформовності, поетапного та граничного формоутворення напівфабрикату. Ефективним теоретичним методом дослідження процесів точного об'ємного штампування (ТОШ) видавлюванням є енергетичний метод балансу потужностей [3, 5–9]. Розробка технологічних процесів холодного видавлювання в цьому контексті спирається на систему моделей, необхідних для забезпечення реалізації основних етапів проектування із використання САПР. Тому актуальним питанням є розробка класифікації за основним характеристиками та властивостями кінематичних модулів, як складових розрахункової схеми процесу, та вироблення відповідних рекомендацій стосовно раціональності їх використання. Саме конструктивні особливості інструменту (наявність або відсутність фасок, заокруглень, крайок) є факторами керування формоутворенням деталі та значно розширюють можливості використання комбінованого суміщеного видавлювання. Однак це накладає умови із забезпечення можливостей оперативного аналізу їх раціональності за рахунок внесення відповідних змін в побудовані базові розрахункові моделі саме на етапі проектування. Таку оперативність урахування комплексу технологічних факторів, в тому числі із зміни конфігурації інструменту, та їх впливу на формоутворення і дефектоутворення напівфабрикату демонструє енергетичний метод балансу потужностей (ЕМБП). При цьому використання модульного підходу в рамках застосування ЕМБП значно спрощує етап проектування з оцінки раціональності саме процесів комбінованого суміщеного видавлювання для виготовлення складнопрофільованих деталей, що відповідають розмірам готової деталі [3, 10–14].

Використання кінематичних модулів трикутної та трапецеїдальної форми дозволило розробити розрахункові моделі прогнозування силового режиму та формоутворення процесів радіально-поздовжнього видавлювання [9, 12]. Застосування трапецеїдальних кінематичних модулів також надало можливість прогнозувати дефектоутворення у вигляді утягнення в донній частині напівфабрикату при комбінованому радіально-зворотному видавлюванні порожнистих деталей [8, 15]. Спроби виявити обмеження у використанні осьового кінематичного модуля трапецеїдальної форми з огляду на форми суміжних кінематичних модулів наведено в роботах [9, 16]. Однак узагальнення та систематизацію властивостей цих модулів не проводили, як і перевірку доцільності в порівнянні із кінематичними модулями з паралельною течією та виявлення обмежень їх використання з огляду на особливості суміжних кінематичних модулів. Таким чином, напрямки розширення можливостей використання ЕМВО полягають у систематизації розроблених кінематичних модулів з огляду розробки їх як елементів оперативного включення в загальні розрахункові схеми із наявністю рекомендацій щодо раціональності їх застосування та напрямків подальшого удосконалення та підвищення оперативності процесу проектування.

Метою роботи є удосконалення проектування процесів точного холодного об'ємного штампування видавлюванням на основі розвитку енергетичного методу балансу потужностей.

На першому етапі проектування на основі вихідної інформації проводиться оцінка можливості використання процесів ТОШ видавлюванням для отримання деталей необхідної конфігурації. Аналіз перш за все ґрунтується на комплексі обмежень, характерних для досліджуваних способів комбінованого видавлювання, основні з яких пов'язано із ресурсом пластичності та можливістю різного роду дефектоутворенням. З іншого боку для процесів з двома ступенями свободи течії обов'язковим є контроль відповідності розмірів деталі, що є затребуваними. При чому у разі відхилень саме оперативний аналіз можливості керування течією металу введенням змін у конфігурацію інструментів (фасок або заокруглень) дозволяє отримати відповідь на питання доцільності обраного способу комбінованого видавлювання. Побудова такого комплексу альтернативних варіантів технологічного процесу і визначає наступний етап процесу проектування, що буде тим більш раціональним, чим оперативніше ці альтернативні варіанти будуються та порівнюються один з одним. З огляду на ефективність застосування в межах ЕМБП методу кінематичних модулів на перший план виходить розробка таких нових кінематичних модулів та їх комплектів, вбудовуваність яких в базову розрахункову схему не буде викликати труднощів та дозволить врахувати вплив різних конструктивних особливостей (фасок або заокруглень) перш за все на формоутворення деталі.

Аналіз найуживаніших уніфікованих кінематичних модулів трапецеїдальної та трикутної форми дозволив виокремити особливості, властивості та обмеження їх використання перш за все з огляду на розташування, форму та кількість ступенів свободи течії металу. Це в свою чергу надало можливості запропонувати розширену класифікацію відомих та розроблених кінематичних модулів та намітити перспективи пошуку розширення їх можливостей.

Класифікація уніфікованих кінематичних модулів за:

1) формою (прямокутна у найпростішому варіанті, трапецеїдальна або трикутна із прямолінійною або криволінійної межею (або межами у більш складному варіанті);

2) розташуванням (осьовий (А) або кільцевий, внутрішній (І) або зовнішній з точки зору заповнення із плином процесу деформування, що враховує особливості конфігурації інструменту) та кількістю меж із суміжними кінематичними модулями та контакту заготовки та інструменту;

3) кількістю швидкостей на вході / виході із модуля, що визначає степінь свободи течії металу (одна в найпростішому варіанті чи більше);

4) наявністю / відсутністю швидкостей входу / виходу через похилі межі модуля, що вказує на зміни характеру течії металу від поздовжнього до радіального та навпаки;

5) наявністю / відсутністю обмежень кривої, що описує похилу межу (можливості розгляду у якості сімейства функцій певного параметру варіювання) або відсутності цієї можливості;

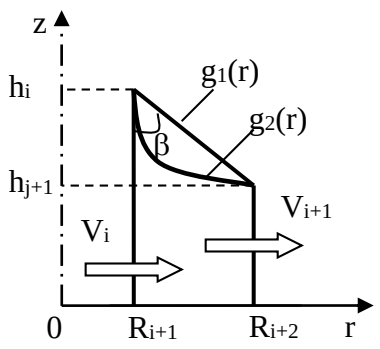
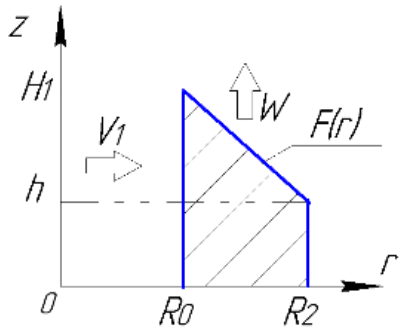
6) наявністю / відсутністю обмежень із варіації конфігурації суміжних модулів, що визначає обмеження у використанні модуля;

7) наявністю випадків виродження модуля у іншу форму або наявністю частинних випадки з меншим ступенем свободи течії металу.

Фрагмент систематизація кінематичних модулів трапецеїдальної форми за вище сформульованими ознаками наведений в табл. 1. Для наведених кінематичних модулів у передостанньому рядку вказано на наявність (або відсутність) обмежень для суміжних модулів, в останньому рядку окреслено питання, вирішення яких дозволять розширити можливості їх застосування у перспективі.

Таблиця 1

Фрагмент систематизації кінематичних модулів трапецеїдальної форми

	
Кільцевий зовнішній 1 похила та 1 горизонтальна межі контакту з інструментом 2 вертикальні межі із суміжними модулями	Кільцевий внутрішній 1 горизонтальна (або мертвою зоною) та 1 вертикальна межі контакту з інструментом 1 вертикальна та 1 похила межі із суміжними модулями
Один ступінь свободи течії: 1 вхідна швидкість 1 вихідна швидкість	Один ступінь свободи течії: 1 вхідна швидкість 1 вихідна швидкість
Швидкостей входу (виходу) через похилу межу немає Зміни напрямку течії немає	Швидкість входу / виходу через похилу межу є; зміна напрямку течії є
Варіативність форми кривої є Обмеження на криву є Найпростіший випадок похилої межі – пряма	Варіативність форми кривої є Обмеження на криву є Найпростіший випадок похилої межі – пряма
Обмежень щодо суміжних кінематичних модулів немає	Обмеження є (з похилою межею контактує тільки жорсткий суміжний модуль)
Розширення за рахунок додавання швидкості входу / виходу через похилу (або горизонтальну) межу	Питання щодо виродження в трикутний при h=0 Розширення за рахунок додавання швидкості входу / виходу через горизонтальну (або горизонтальну) межу

Для більшої інформативності для програмної реалізація досліджень в рамках ЕМБП запропоновано використання спрощеної схеми кінематичного модуля із позначеннями:

– для меж модуля: суцільна лінія позначає межі з інструментом або жорсткою зоною (за відсутності радіальної складової плину), пунктирна відповідає за поєднання із суміжними модулями довільної форми; похилі межі різної форми – варіаціями у формі другої кривої;

– швидкості на поверхнях входу та виходу позначаються за допомогою індексів i та $i + 1$;

– для наочності знаки «+» та «-» на межах поєднання із суміжними модулями використовуються для врахування особливостей обчислення повної величини приведеного тиску потужності сил зрізу.

Проведена систематизація кінематичних модулів дозволила виокремити напрямки побудови кінематичних модулів складної конфігурації, що є альтернативними до модулів із паралельною прямолінійною течією металу. З огляду на необхідність врахування особливостей конфігурації інструменту (наприклад, конусності протипуансону) або перебігу течії металу всередині заготовки в осьовій зоні розроблено альтернативні кінематичні модулі трапецеїдальної форми та їх комплекси (рис. 1). Приклади реалізації даних кінематичних модулів в розрахункових схемах наведено в роботах [3, 9, 12, 17]. Компактну інтерпретацію розрахунків кінематичних модулів із виробленими рекомендаціями з їх застосування реалізовано в одному із модулів програмного продукту «EXTRUSION» у формі окремого модуля Modules.exe (рис. 2).

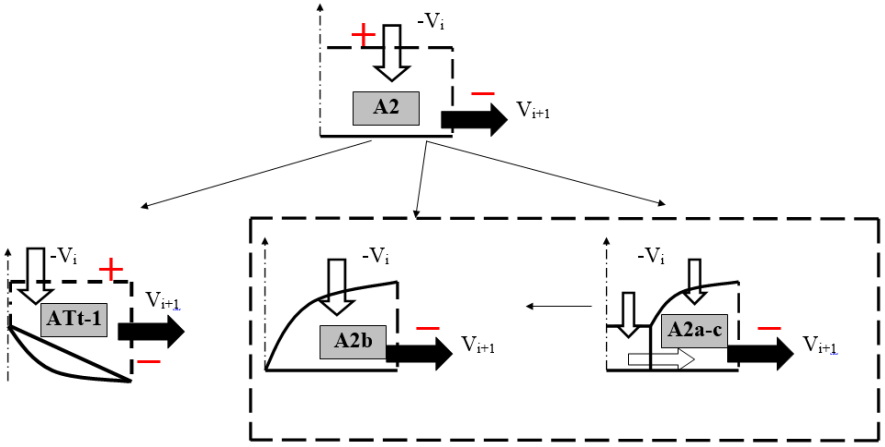


Рис. 1. Комплекс альтернативних осьових кінематичних модулів та їх комплексів із зміною напрямку течії

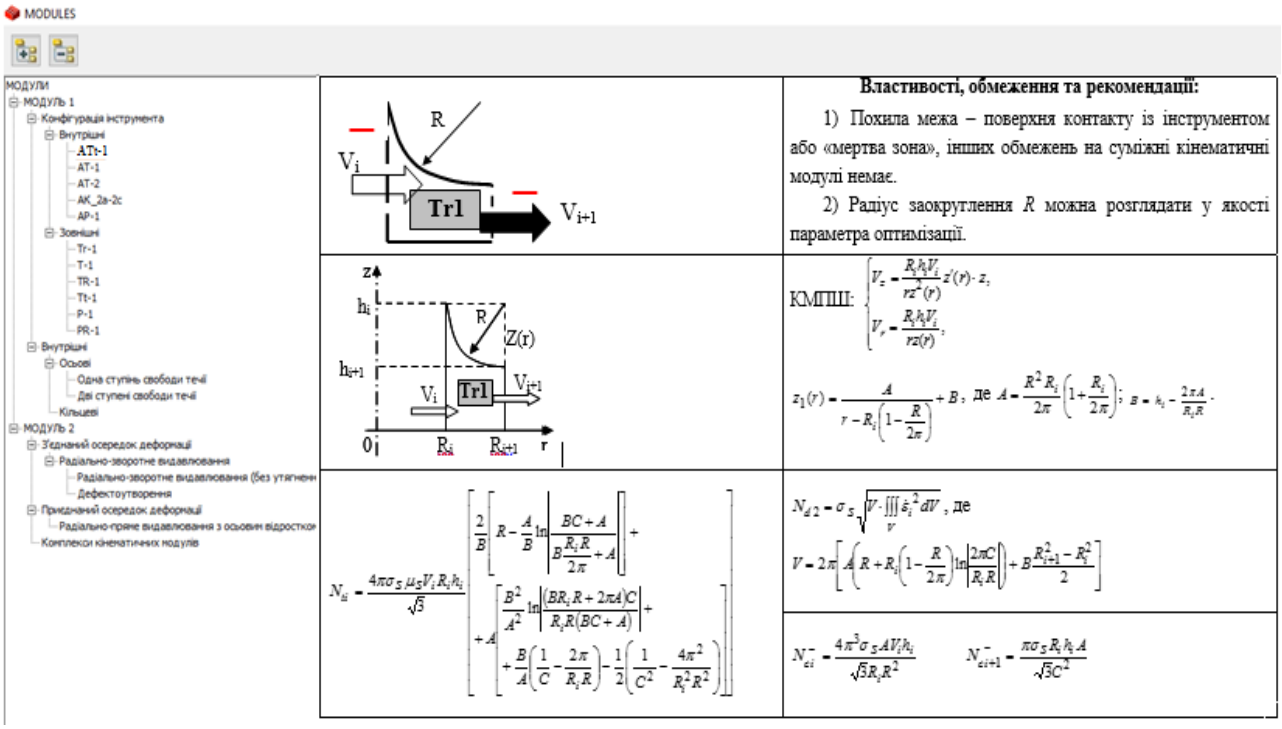


Рис. 2. База альтернативних кінематичних модулі та їх комплексів

Модуль розрахунків extrude_eng.exe доповнюється розрахунковими моделями прогнозування процесів комбінованого видавлювання (рис. 3). Для аналізу моделей є можливість використання похилої межі різної форми, варіювання умов тертя згідно закону Зібеля в межах від 0 до 0,5 та матеріалу з наведених в базі, яку можна оперативно доповнювати.

Таким чином, проведена систематизація кінематичних модулів складної конфігурації дозволила виявити особливості їх застосування та напрямки пошуку нових кінематичних модулів, що є альтернативними до відомих із паралельною течією. Основними напрямками розширення бази кінематичних модулів є розробка кінематичних модулів трапецеїдальної та трикутної форми (та їх комплексів) за рахунок використання криволінійних меж та збільшення ступенів свободи течії металу. При цьому необхідним є порівняльний аналіз їх використання із застосуванням більш простих модулів із паралельною течією та виявлення меж раціональності такої заміни. Це сприятиме більш ефективному та оперативному використанню ЕМБП для визначення оптимальних параметрів конфігурації інструмента та розробці відповідних конструкторсько-технологічних рекомендацій при проектуванні процесів точного об'ємного штампування видавлюванням.

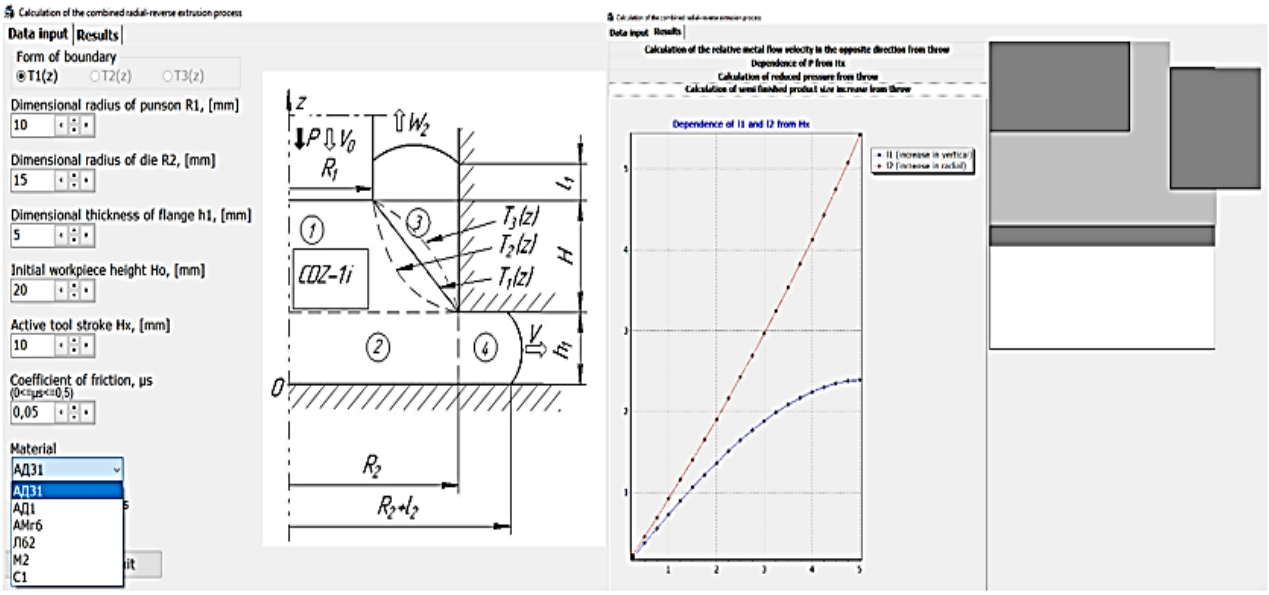


Рис. 3 Вікно вибору розрахункової схеми та приростів деталі

ВИСНОВКИ

В роботі запропоновано класифікацію уніфікованих кінематичних модулів за основними характеристиками, надано рекомендації раціональності використання кінематичних модулів трапецеїдальної та трикутної форми за жорсткістю комбінування із суміжними кінематичними модулями, можливістю варіювання форми межі та розташуванням відповідно осі симетрії. Розширено базу уніфікованих кінематичних модулів трапецеїдальної і трикутної форми та їх комплексів та надано рекомендації з огляду на можливості і обмеження їх використання при побудові розрахункових схем процесів із можливістю оперативної зміни конфігурації інструменту (наявності або відсутності фаски та заокруглення). Це забезпечує можливості оперативного керування формоутворенням складнопрофільованих деталей у процесах суміщеного комбінованого видавлювання з декількома ступенями свободи течії металу, що дозволяє на етапі проектування процесів комбінованого видавлювання визначитися із оптимальною конфігурацією інструменту. Розрахунки кінематичних модулів складної форми, рекомендації з їх застосування, комплекс розрахункових моделей прогнозування силового режиму та формоутворення в процесах комбінованого видавлювання реалізований у програмному продукті «EXTRUSION». Окреслені перспективні напрямки удосконалення процесу проектування процесів точного об'ємного штампування видавлюванням сприятимуть впровадженню процесів суміщеного комбінованого видавлювання на виробництві.

ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРИ

1. Aliev I. S. Radial extrusion processes. *Soviet Forging and Metal Stamping Technology (English Translation of Kuznechno-Shtampovochnoe Proizvodstvo)*. 1988. Part 3. pp. 54–61. ISSN: 0891-334
2. Bhaduri A. Extrusion. In: Mechanical Properties and Working of Metals and Alloys. *Springer Series in Materials Science*. 2018. 264, pp. 599–646. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-10-7209-3_13
3. Алиева Л. И. Совершенствование процессов комбинированного выдавливания: монография. Краматорск: ООО «Тираж-51». 2018. 352 с. ISBN 978-966-379-846-2
4. Farhoumand A., Ebrahimi R. Analysis of forward–backward-radial extrusion process. *Materials and Design.* 2009. 30. 6, pp. 2152–2157. DOI: https://doi.org/10.1016/j.matdes.2008.08.025
5. Степанский Л. Г. Расчеты процессов обработки металлов давлением. Москва: Машиностроение. 1979. 215 с.
6. Noh J., Hwang B.B., Le H. Y. Influence of Punch Face Angle and Reduction on Flow Mode in Backward and Combined Radial Backward Extrusion Process. *Metals and Materials International*. 2015, 21, 6, pp.1091–1100. DOI: https://doi.org/10.1007/s12540-015-5276-y
7. Choi H. J, Choi J. H., Hwang B. B. The forming characteristics of radial-backward extrusion. *J Mater Process Technol*. 2001, 113, pp. 141–147. DOI: https://doi.org/10.1016/S0924-0136(01)00703-8
8. Aliiev I., Aliieva L., Grudkina N., Zhbankov Ya. Prediction of the variation of the form in the processes of extrusion. *Metallurgical and Mining Industry*. 2011. 3(7), pp. 17–22. https://www.metaljournal.com.ua/assets/Uploads/attachments/17Aliiev.pdf
9. Hrudkina N. , Aliieva L., Markov O., Kartamyshev D., Shevtsov S., Kuznetsov M. Modeling the process of radial-direct extrusion with expansion using a triangular kinematic module. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. 3/1 (105), pp. 17–22. DOI: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.203989
10. Алиев И. С., Носаков А. А., Махмудов К. Д. Метод кинематических модулей для анализа процессов точной объемной штамповки. *Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні.* Зб. наук. пр. Краматорськ: ДДМА. 2001. С. 142–146.
11. Грудкина Н. С., Алиева Л. И., Малий К. В. Проектирование процессов холодного выдавливания на основе энергетических расчетных модулей. *Обработка материалов давлением*. Краматорск: ДГМА. 2020. 1 (50). С. 67–76.
12. Aliieva L., Hrudkina N., Aliiev I., Zhbankov I., Markov O. Effect of the tool geometry on the force mode of the combined radial-direct extrusion with compression. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Engineering technological systems.* 2020. 2. 1 (104), pp. 15 –22. DOI: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.198433
13. Aliieva L. I., Markov O. Y., Aliiev I. S., Hrudkina N. S., Levchenko V. N., Malii Kh. V. Analysis of power parameters of the combined three-direction extrusion process. *FME Transactions*. 2021. 49. 2, pp. 344–355. https://www.mas.bg.ac.rs/_media/istrazivanje/fme/vol49/2/9_oe_markov_et_al.pdf
14. Chang Y. S., Hwang B. B. A study on the forming characteristics of radial extrusions combined with forward extrusion. *Transactions of Materials Processing*. 2000. 9. 3, pp. 242–248.
15. Hrudkina N. S., Markov O. E., Shapoval A. A., Titov V. A., Aliiev I. S., Abhari P., Malii K. V. Mathematical and Computer Simulation for the Appearance of Dimple Defect by Cold Combined Extrusion. *FME Transactions*. 2022. 50. 1, pp. 90–98. DOI: https://doi: 10.5937/fme2201090H
16. Hrudkina N. S., Aliieva L. I. Modeling of cold extrusion processes using kinematic trapezoidal modules. *FME Transactions*. 2020. 48. 2, pp. 357–363. DOI: doi:10.5937/fme2002357H
17. Алиева Л. И. Деформирование заготовок способом радиального выдавливания с противодавлением. *Вісник ХНТУ*. Херсон. 2016. 2 (57). С. 29–36.

REFERENCES

1. Aliev I.S. Radial extrusion processes. *Soviet Forging and Metal Stamping Technology (English Translation of Kuznechno-Shtampovochnoe Proizvodstvo)*. 1988. Part 3. pp. 54–61. ISSN: 0891-334x
2. Bhaduri A. Extrusion. In: Mechanical Properties and Working of Metals and Alloys. *Springer Series in Materials Science*. 2018. 264, pp. 599–646. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-10-7209-3_13
3. Aliieva L.I. Improvement of combined extrusion processes: monograph. Kramatorsk: LLC "Tiraj – 51". 2018. 352 p. ISBN 978-966-379-846-2. (*in Russian*).
4. Farhoumand A., Ebrahimi R. Analysis of forward–backward-radial extrusion process. *Materials and Design.* 2009. 30. 6, pp. 2152–2157. DOI: https://doi.org/10.1016/j.matdes.2008.08.025
5. Stepanskiy L.G. Calculations of metal forming processes. Moscow: Mechanical Engineering. 1979, 215 p. (*in Russian*).
6. Noh J., Hwang B.B., Le H.Y. Influence of Punch Face Angle and Reduction on Flow Mode in Backward and Combined Radial Backward Extrusion Process. *Metals and Materials International*. 2015, 21, 6, pp.1091–1100. DOI: https://doi.org/10.1007/s12540-015-5276-y
7. Choi H.J, Choi J.H., Hwang B.B. The forming characteristics of radial-backward extrusion. *J Mater Process Technol*. 2001, 113, pp. 141–147. DOI: https://doi.org/10.1016/S0924-0136(01)00703-8

8. Aliiev I., Aliieva L., Grudkina N., Zhbankov Ya. Prediction of the variation of the form in the processes of extrusion. *Metallurgical and Mining Industry*. 2011. 3(7), pp. 17–22. https://www.metaljournal.com.ua/assets/Uploads/attachments/17Aliiev.pdf

9. Hrudkina N., Aliieva L., Markov O., Kartamyshev D., Shevtsov S., Kuznetsov M. Modeling the process of radial-direct extrusion with expansion using a triangular kinematic module. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. 3/1 (105), pp. 17–22. DOI: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.203989

10. Aliiev I.S., Nosakov A.A., Makhmudov K.D. The method of kinematic modules for the analysis of processes of precise forging. *Improvement of processes and possession of vise processing in metallurgy and machine-building.* Kramatorsk: DSEA. 2001, pp. 142–146. (*in Russian*).

11. Hrudkina N.S., Aliieva L.I., Malii K.V. Design of cold extrusion processes based on energy calculation modules. *Materials Working by Pressure*. Kramatorsk: DSEA. 2020. 1 (50), pp. 67–76. (*in Russian*).

12. Aliieva L., Hrudkina N., Aliiev I., Zhbankov I., Markov O.. Effect of the tool geometry on the force mode of the combined radial-direct extrusion with compression. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Engineering technological systems.* 2020. 2. 1 (104), pp. 15 –22. DOI: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.198433

13. Aliieva L. I., Markov O. Y., Aliiev I. S., Hrudkina N. S., Levchenko V. N., Malii Kh. V. Analysis of power parameters of the combined three-direction extrusion process. *FME Transactions*. 2021. 49. 2, pp. 344–355. https://www.mas.bg.ac.rs/_media/istrazivanje/fme/vol49/2/9_oe_markov_et_al.pdf

14. Chang Y.S., Hwang B.B. A study on the forming characteristics of radial extrusions combined with forward extrusion. *Transactions of Materials Processing*. 2000. 9. 3, pp. 242–248.

15. Hrudkina N.S., Markov O.E., Shapoval A.A., Titov V.A., Aliiev I.S., Abhari P., Malii K.V. Mathematical and Computer Simulation for the Appearance of Dimple Defect by Cold Combined Extrusion. *FME Transactions*. 2022. 50. 1, pp. 90–98. DOI: https://doi: 10.5937/fme2201090H

16. Hrudkina N. S., Aliieva L. I. Modeling of cold extrusion processes using kinematic trapezoidal modules. *FME Transactions*. 2020. 48. 2, pp. 357–363. DOI: doi:10.5937/fme2002357H

17. Aliieva L.I. Deformation of workpieces by the method of radial extrusion with counterpressure. *Bulletin of KhNTU*. Kherson, 2016. 2 (57), pp. 29–36. (*in Russian*).

Грудкина Н. С., Левченко В. Н., Абхари П., Коцюбивская Е. И., Малий К. В. Особенности проектирования процессов точной объемной штамповки выдавливанием на основе энергетических моделей расчета

В работе продемонстрированы возможности эффективного использования энергетического метода баланса мощностей при проектировании процессов точной объёмной штамповки выдавливанием. Проведена классификация кинематических модулей по основным характеристикам, что повышает оперативность их использования на этапе построения расчетных схем процессов. Даны рекомендации рационального использования унифицированных кинематических модулей с учётом ограничений их комбинирования со смежными кинематическими модулями, возможностей варьирования формы и расположения относительно оси симметрии. Расширена база унифицированных кинематических модулей трапецеидальной и треугольной формы и даны рекомендации с точки зрения рациональности и ограничений их использования при построении расчетных схем процессов с учетом оперативного изменения конфигурации инструмента (наличия или отсутствия фаски и скругления). Это обеспечило возможность оперативного управления формообразованием сложнопрофильных деталей в процессах совмещенного комбинированного выдавливания с несколькими степенями свободы течения металла, которые проходят в саморегулирующемся режиме. Разработан программный модуль по систематизации базы унифицированных кинематических модулей, составляющих их расчета и рекомендаций по использованию и комплекса энергетических расчетных моделей процессов точной объёмной штамповки выдавливанием с прогнозированием силового режима и формообразования детали. Очерчено перспективные направления усовершенствования проектирования процессов точной объёмной штамповки выдавливанием на основе энергетических моделей расчета, что будет способствовать внедрению процессов совмещенного комбинированного выдавливания на производстве.

Ключевые слова: *точная объемная штамповка, совмещенное комбинированное выдавливание, кинематический модуль, энергетический метод баланса мощностей, проектирование, расчетная модель.*

Hrudkina N., Levchenko V., Abhari P., Kotsiubivska K., Malii Kh. The features of the precise forging processes by extrusion design based on energy calculation models

The article demonstrates the possibilities of effective using the energy method of power balance for design of precise forging processes by extrusion. The classification of kinematic modules according to the main characteristics has been carried out, which increases the efficiency of their using at the stage of developing calculating schemes of the processes. The recommendations are given for rational using the unified kinematic modules, taking into account the limitations of their combination with adjacent kinematic modules, the possibility of varying the shape and location relative to the axis of symmetry. The base of unified kinematic modules of trapezoidal and triangular shapes has been expanded and recommendations in terms of rationality and limitations of their using at developing calculation schemes for the processes are given, taking into account operational configuration changing of the tool (presence or absence of chamfer and rounding). This made it possible to quickly control of complex-profile parts forming for the incorporated combined extrusion processes with several degrees of freedom of metal flow, which take place in self-regulating mode. A software

module has been developed to systematize the base of unified kinematic modules, the components of their calculation and recommendations for using and the set of energy calculation models for the processes of precise forging by extrusion with prediction of the power mode and forming of the part. The promising directions for improving design of precise forging processes by extrusion based on energy calculation models are outlined, that will contribute to the introduction of incorporated combined extrusion processes in manufacturing.

Key words: *precise forging, incorporated combined extrusion, kinematic module, power balance energy method, design, calculation model.*

Грудкіна Наталія Сергіївна – д-р техн. наук, доцент ДДМА
Hrudkina Natali – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of DSEA
Грудкина Наталья Сергеевна – д-р техн. наук, доц. ДГМА
E-mail: vm.grudkina@ukr.net
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-0914-8875

Левченко Володимир Миколайович – канд. техн. наук, мол. наук. співроб. ІРЕ ім. О. Я. Усикова НАНУ
Levchenko Volodymyr – Candidate of Technical Sciences, Junior Researcher of Ya. Usikov IRE of NASU
Левченко Владимир Николаевич – канд. техн. наук, мл. науч. сотр. ИРЭ им. А. Я. Усикова НАНУ
E-mail: goldangel271@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2411-4198

Абхарі Пейман – д-р техн. наук, професор ДДМА
Abhari Payman – Doctor of Technical Sciences, Full Professor of DSEA
Абхари Пейман – д-р техн. наук, проф. ДГМА
E-mail: payharies@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0827-8149

Коцюбівська Катерина Іванівна – канд. техн. наук, доцент, завідувачка кафедрою КНУКМ
Kotsiubivska Kateryna – PhD in Technical Science, Associate Professor KNUCA
Коцюбивская Екатерина Ивановна – канд. техн. наук, доцент, заведующая кафедрой КНУКИ
E-mail: katysivak@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3987-9871

Малій Христина Василівна – канд. техн. наук, доцент ТУМП
Malii Khrystyna – PhD, Associate Prof. TUMP
Малий Кристина Васильевна – канд. техн. наук, доцент ТУМП
E-mail: kristina.v.goncharuk@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9046-4268

ДДМА – Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ
DSEA – Donbass State Engineering Academy, Kramatorsk
ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск

ІРЕ ім. О. Я. Усикова НАНУ – Інститут радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України, м. Харків
Ya. Usikov IRE of NASU – O. Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics of National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkiv
ИРЭ им. А. Я. Усикова НАНУ – Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова Национальной академии наук Украины, г. Харьков

КНУКМ – Київський національний університет культури і мистецтв, м. Київ
KNUCA – Kyiv National University of Cultural and Arts, Kyiv
КНУКИ – Киевский национальный университет культуры и искусств, г. Киев

ТУМП – ТОВ «Технічний університет «Метінвест Політехніка», м. Запоріжжя
TUMP – Metinvest Polytechnic Technical University LLC, Zaporizhzhia
ТУМП – ООО «Технический университет «Метинвест Политехника», г. Запорожье

Статья поступила в редакцию 10.06.2022 г.

УДК. 621.7 DOI: 10.37142/2076-2151/2022-1(51)46

Калюжний В. Л.
Левченко В. М.
Ярмоленко О. С.
Таган Л. В.

ВПЛИВ ШВИДКОСТІ ДЕФОРМУВАННЯ НА ГАРЯЧЕ ЗВОРОТНЕ ВИДАВЛЮВАННЯ ОСЕСИМЕТРИЧНОГО ПОРОЖНИСТОГО ВИРОБУ

Моделюванням методом скінченних елементів вивчено вплив швидкості деформування на процес гарячого зворотного видавлювання з осаджуванням із високовуглецевої сталі осесиметричного порожнистого виробу з виступом на торці донної частини. Швидкість переміщення пуансону змінювалася від 50 до 400 мм/сек. Проведено розрахунковий аналіз процесів видавлювання з осаджуванням, процесів вилучення пуансонів із здеформованих заготовок та процесів виштовхування виробів із матриць. Встановлено залежності зусилля видавлювання від переміщення пуансона, залежності зусилля вилучення пуансона від його зворотного переміщення і залежності зусилля виштовхування виробу з матриці від переміщення виштовхувача. За величинами нормальних напружень визначено розподіл питомих зусиль на торцях пуансона, виштовхувача та по висоті поверхні матриці. Збільшення швидкості деформування з 50 до 200 мм/сек призводить до суттєвого зниження зусилля деформування. Подальше зростання швидкості мало впливає величину зусилля. Наведено рекомендації щодо вибору пресового обладнання. Для кінцевої стадії видавлювання з осаджуванням показано розподіл температури, компонент напружень і деформацій в деформованому металі. Визначено температуру охолодження в шарах металу, розташованих поблизу контактуючих поверхонь. Встановлено кінцеві форма та розміри виробу. Для одержання рівного торця стінки необхідна додаткова операція його підрізання. Проробку структури металу пластичною деформацією оцінено за величиною інтенсивності деформацій у стінці та донній частині виробу. Одночасне формоутворення зворотним видавлюванням з осаджуванням призводить до більш інтенсивного пропрацювання структури металу пластичною деформацією і знижує нерівномірність інтенсивності деформацій по ширині стінки виробу.

Ключові слова: *гаряче видавлювання з осаджуванням, порожній виріб, метод скінченних елементів, швидкість деформування, зусилля, температура, напруження, деформація.*

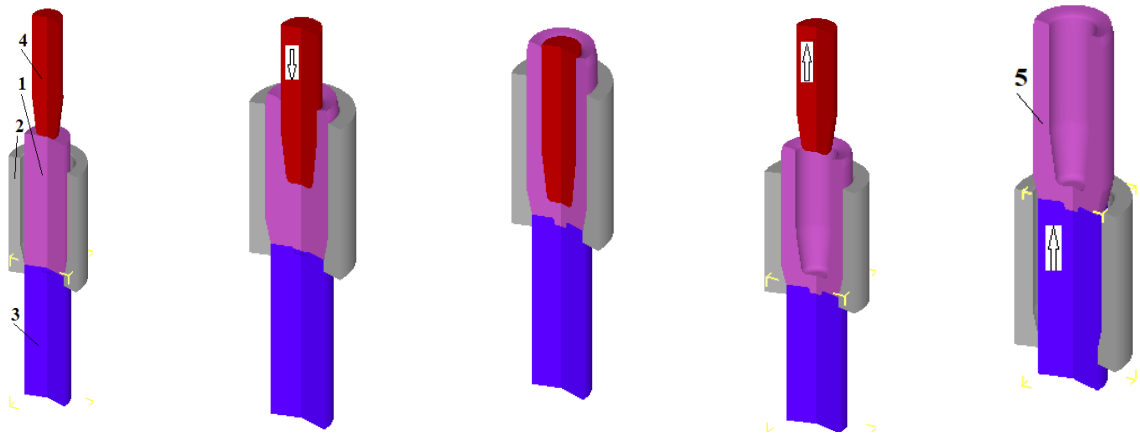
Для виробництва осесиметричних порожнистих виробів різної форми та розмірів використовують процеси точного об’ємного штампування видавлюванням [1–4]. Процеси гарячого зворотного видавлювання достатньо добре описано в джерелі [5], в якому наведено рекомендації з проектування технології і штампового оснащення. В вищезгаданому джерелі мало інформації щодо впливу швидкості деформування на гаряче пластичне формоутворення та практично відсутні дані з проектування технології гарячого зворотного видавлювання порожнистих виробів із високовуглецевих сталей, зокрема із сталі AISI 1060.

В теперішній час виготовляється гідравлічне пресове обладнання з високою швидкістю деформування, яке при забезпечує якість і продуктивність виробництва. Тому актуальними задачами є визначення впливу швидкості деформування на параметри гарячого зворотного видавлювання порожнистих виробів [6–8]. Застосування методу скінченних елементів (МСЕ) для визначення параметрів гарячого штампування дозволяє суттєво зменшити час та витрати на підготовку виробництва різноманітних виробів [9, 10]. Особливо високу ефективність має використання МСЕ для встановлення параметрів гарячого штампування виробів з необхідним пропрацюванням структури металу пластичною деформацією по всьому об’єму або в окремих частинах виробів [11]. Приклади забезпечення потрібного пропрацювання на конкретних деталях, в тому числі в порожнистих виробах із кольорових металів і сталей наведено в роботах [12, 13]. Таке пропрацювання призводить до отримання заданих згідно робочого креслення деталі механічних властивостей у здеформованому металі. Додатково збільшити пропрацювання структури металу можна застосовуючи формоутворення одночасним зворотним видавлюванням з осаджуванням. При цьому використовують вихідні заготовки меншого діаметру або квадратного перерізу та дещо знижується зусилля деформування.

Метою роботи є встановлення за допомогою методу скінченних елементів впливу швидкості деформування на параметри гарячого зворотного видавлювання з осаджуванням вісесиметричного порожнистого виробу із високовуглецевої сталі.

Розрахунковий аналіз проводили за допомогою моделювання з використанням скінченно-елементної програми DEFORM та циліндричної системи координат. Температура вихідної заготовки із сталі AISI 1060 діаметром D_o = 97 мм і висотою H_o = 285 мм становила 1000 °С. Для вказаної сталі рекомендують температурний інтервал штампування у межах 1100÷800 °С. Швидкість деформування (швидкість переміщення пуансону) складала V_o = 50, 100, 150, 200, 300 і 400 мм/сек. Тертя на контактуючих поверхнях враховували по Зібелю з коефіцієнтом тертя μ = 0,25. Розміри інструменту, що деформує, який вважався абсолютно жорстким і мав температуру 20 °*С*, будуть представлені нижче. Процес формоутворення порожнистого виробу виконувався зворотним видавлюванням з одночасним осаджуванням заготовки.

Розрахункові положення деформуючого інструменту в розрізі на різних стадіях видавлювання з осаджуванням показано на рис. 1. Положення інструменту на початку видавлювання зображено на рис. 1,*а*. Вихідну заготовку 1 встановлено в матриці 2 на виштовхувачі 3. Виштовхувач 3 має на торці порожнину для отримання виступу на нижньому торці донної частини виробу. Деформування здійснюється пуансоном 4. Положення на проміжній стадії зображено на рис. 1,*б*. При опусканні пуансона 4 відбувається формоутворення порожнини і осаджування здеформованої заготовки. При цьому висота заготовки спочатку зменшується і вона повністю заповнює матрицю по висоті.



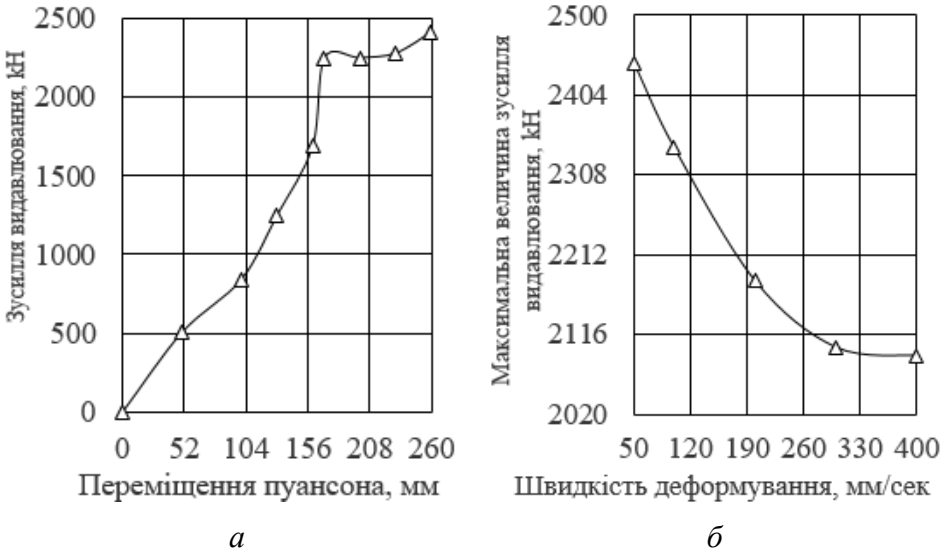
а *б* *в* *г* *д*

Рис. 1. Розрахункові положення в розрізі деформуючого інструменту при видавлюванні з осаджуванням:

а – на початку видавлювання, *б* – на проміжній стадії видавлювання, *в* – в кінці видавлювання, *г* – після виймання пуансона, *д* – після виштовхування виробу

Положення після виймання (вилучення) пуансону із здеформованої заготовки наведено на рис. 1,*г*, а після виштовхування виробу 5 із матриці 2 – на рис. 1,*д*.

Силові режими при видавлюванні з осаджуванням зі швидкістю деформування V_o = 50 мм/сек наведено на рис. 2. На рис. 2, *а* зображено залежність зусилля видавлювання від переміщення пуансона. Графік зусилля має неусталену і усталену стадії. На неусталеній стадії зусилля інтенсивно зростає і сягає величини 2200 кН при переміщенні пуансону 170 мм. Наусталеній стадії зусилля збільшується повільно та сягає максимального значення 2410 кН в кінці видавлювання при переміщенні пуансону 259 мм. Аналогічні залежності отримано для інших величин швидкостей деформування. Залежність максимальної величини зусилля видавлювання з осаджуванням від швидкості деформування V_o показано на рис. 2, *б*. Із збільшенням величини швидкості з V_o = 50 мм/сек до V_o = 200 мм/сек зусилля деформування значно зменшується, а подальше зростання швидкості практично не впливає на величину зусилля. Така залежність пов'язана з охолодженням шарів металу здеформованої заготовки, які контактують з деформуючим інструментом, про що буде сказано нижче.



а *б*

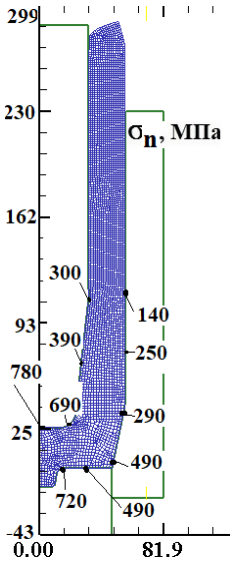
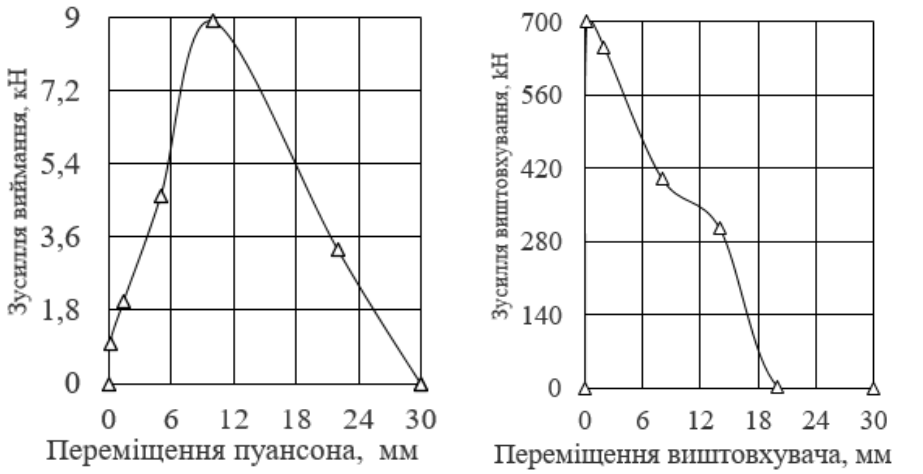


Рис. 3. Розподіли нормальних напружень



в *г*

Рис. 2. Силові режими при видавлюванні з осаджуванням: *а* – залежність зусилля видавлювання від переміщення пуансона, *б* – залежність максимальної величини зусилля видавлювання від швидкості деформування, *в* – залежність зусилля виймання пуансону із здеформованої заготовки від його зворотного переміщення, *г* – залежність зусилля виштовхування виробу з матриці від переміщення виштовхувача

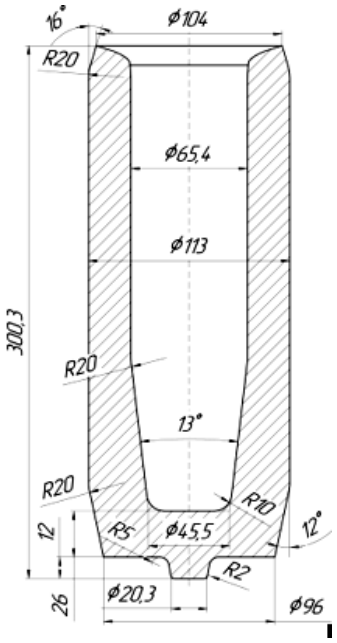


Рис. 4. Форма і розміри виробу

На рис. 2,*в* наведено залежність зусилля виймання пуансона із здеформованої заготовки від його зворотного переміщення (див. рис. 1,*г*). Найбільша величина зусилля виймання склала 8,9 кН. Це приблизно складає 4 % від зусилля видавлювання з осаджуванням. Залежність зусилля виштовхування виробу з матриці від переміщення виштовхувача показано на рис. 2, *г*. Зусилля сягає максимальної величини 700 кН на початку виштовхування і дорівнює 29 % від максимальної величини зусилля видавлювання з осаджуванням. З урахуванням встановлених силових режимів для реалізації процесу видавлювання з осаджуванням необхідно використовувати гідравлічний прес зусиллям 2,5 МН з величною робочого ходу повзуна не менше 260 мм із зусиллям виштовхувача більшим за 700 кН та переміщенням його на меншим за 230 мм. При цьому, з урахуванням встановлених основних розмірів деформуючого інструменту (див. рис. 1) та необхідних підкладних плит і плит штампу, відкрита висота пресу повинна бути 1400 мм.

Для проектування штампового оснащення, крім зусилля виймання пуансона із здеформованої заготовки, потрібно знати розподіл питомих зусиль на контактних поверхнях заготовки з інструментом при максимальному значенні зусилля видавлювання з осаджуванням. Такий розподіл можна отримати по значенням нормальних напружень σ_n, які виникають на контактних поверхнях пуансона, матриці та виштовхувача. Розподіли напружень σ_n наведено на рис. 3. Тут і надалі показано половину здеформованої заготовки, тонкими лініями зображено інструмент, що деформує, а розміри по вісях наведено в міліметрах. На поверхні пуансону із здеформованою заготовкою величини таких напружень отримано у межах σ_n = 690 ÷ 780 МПа, на поверхні матриці – σ_n = 140 ÷ 490 МПа, а на поверхні виштовхувача – σ_n = 490 ÷ 720 МПа. При вказаних питомих зусиллях матриця може бути без бандажів.

Кінцеві форма і розміри виробу представлено на рис. 4. Розміри порожнини визначаються розмірами пуансона, розміри зовнішньої поверхні відповідають розмірам матриці, а розміри торця донної частини дорівнюють розмірам порожнини виштовхувача. На торці стінки виробу має місце утяжина зі сторони порожнини, а на боковій поверхні є певне відхилення від циліндричності. Для отримання рівного торця стінки необхідна додаткова операція його підрізки.

Розподіли температури *T(°C)* по об'єму здеформованої заготовки в кінці видавлювання з осаджуванням зображено на рис. 5. При деформуванні зі швидкістю V_o = 50 мм/сек має місце інтенсивне охолодження здеформованого металу (рис. 5, *а*). В шарах металу стінки зі сторони порожнини температура отримана у межах T = 700 ÷ 800 ^oC, а в шарах металу зі сторони бокової поверхні – T = 610 ÷ 770 ^oC. Аналогічні величини температури отримано в зоні торця пуансону та поблизу поверхні виштовхувача. Тому при цій швидкості отримано максимальне зусилля деформування (див. рис. 2,*б*). В самій стінці і донній частині отримано T = 930 ÷ 1000 ^oC. Збільшення швидкості деформування призводить до зменшення охолодження металу у шарах металу зі сторони порожнини та зі сторони бокової поверхні стінки, а також в зоні під торцем пуансону та біля контактної поверхні виштовхувача. При формоутворенні зі швидкістю V_o = 100 мм/сек (рис. 5,*б*) температура у стінці сягає T = 940 ÷ 1000 ^oC. В шарах металу зі сторони порожнини отримано T = 940 ^oC, а в шарах зі сторони бокової поверхні – T = 740 ^oC. Таким чином, вказані шари металу деформуються в умовах напівгарячої деформації. Збільшення швидкості деформування до V_o = 150 мм/сек призводить до розширення області з температурою металу T = 1000 ^oC (рис. 5, *г*). Подальше зростання швидкості деформування забезпечує формоутворення виробів в умовах гарячої деформації, що показано на рис. 5, *г–е*. При цьому має місце незначне підвищення температури здеформованого металу за рахунок виділення тепла при пластичній деформації. Очевидно, що видавлювання з осаджуванням наступних заготовок в штампі призведе до розігріву інструменту, що деформує, та необхідності застосування для нього примусового охолодження.

Для розглянутих величин швидкостей деформування встановлено напружено-деформований стан металу в кінці видавлювання з осаджуванням. Розподіли осьових σ_z, радіальних σ_r, тангенціальних σ_θ та інтенсивності σ_i напружень при деформуванні зі швидкістю V_o =50 мм/сек зображено на рис. 6. В осередку деформації під пуансоном та між конусною частиною пуансону і матрицею осьові σ_z (рис. 6,*а*), радіальні σ_r (рис. 6,*б*) і тангенціальні σ_θ (рис. 6, *в*) напруження є такими, що стискають, та суттєво зменшуються за абсолютною величиною у циліндричній частині стінки. У донній частині під торцем пуансона осьові напруження отримано у межах σ_z =-360÷-840 МПа, радіальні – σ_r =-380÷-730 МПа, тангенціальні – σ_θ=-370÷-660 МПа. При цьому вигляд розподілів для напружень σ_r і σ_θ практично однаковий. Осередок деформації охоплює всю донну частину здеформованої заготовки, що видно з розподілу інтенсивності напружень σ_i (рис. 6,*г*) В цій частині інтенсивність напружень отримано у межах σ_i =140 ÷ 165 МПа.

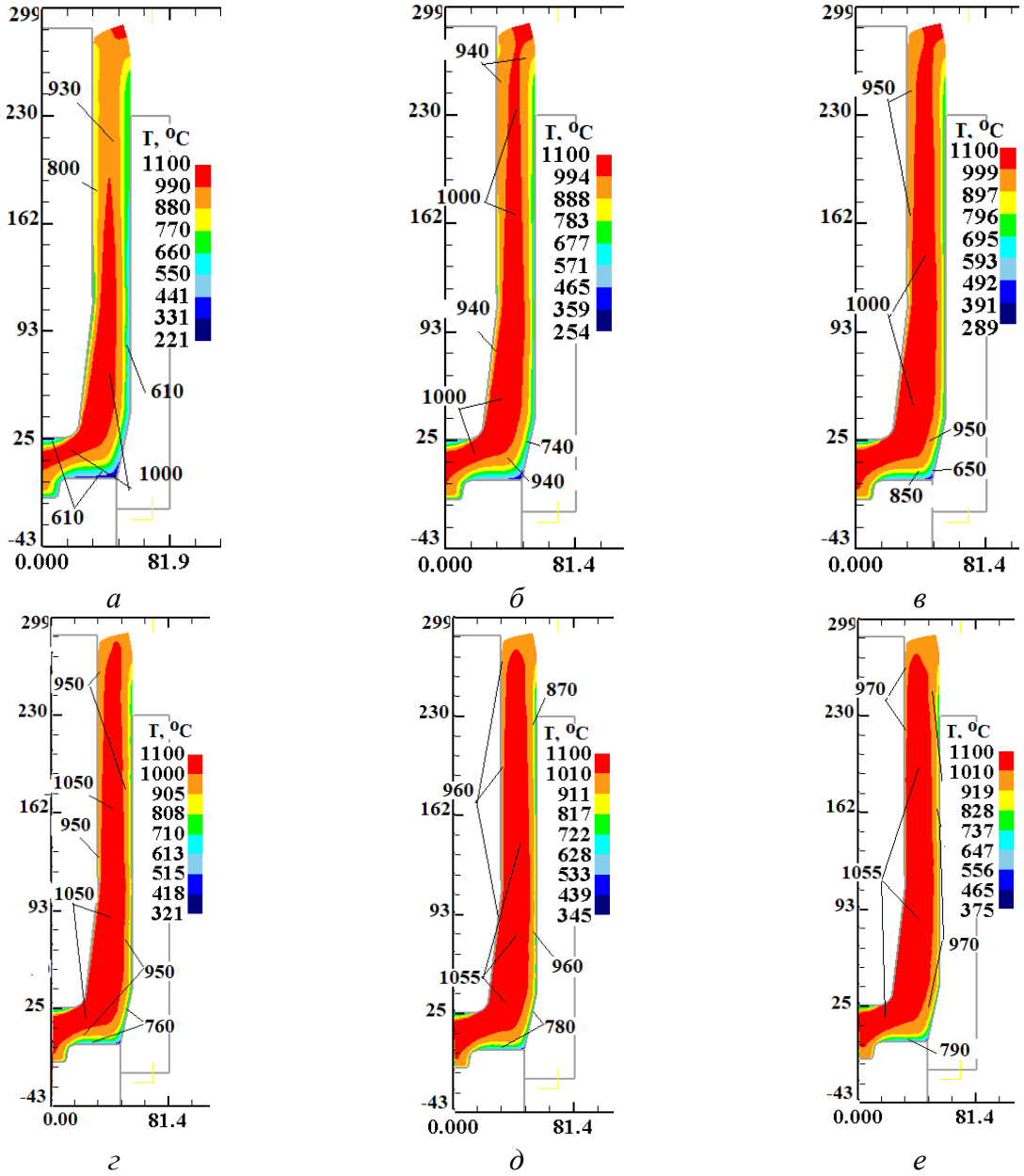
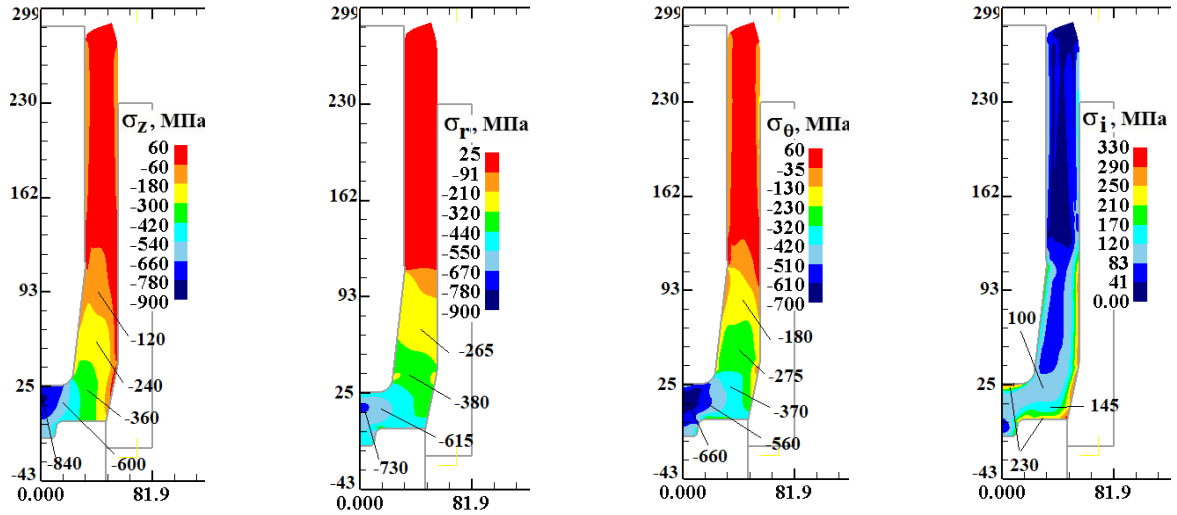


Рис. 5. Розподіли температури $T(^oC)$ у здеформованому металі в кінці видавлювання з осаджуванням із різними швидкостями деформування:

а – V_o = 50 мм/сек, *б* – V_o = 100 мм/сек, *в* – V_o = 150 мм/сек, *г* – V_o = мм/сек, *д* – V_o = 300 мм/сек, *г* – V_o = 400 мм/сек

Розподіли кінцевих осьових ε_z, радіальних ε_r, тангенціальних ε_θ та інтенсивності ε_i деформацій представлено на рис. 7. У донній частині напівфабрикату безпосередньо під торцем пуансону виникають значні осьові деформації, що стискають, величиною у межах ε_z=-0,6÷-2,4 (рис. 7, *а*). При формоутворенні виступу на донній частині ці деформації стають розтягувальними та сягають значень ε_z=0,4. У шарах металу стінки зі сторони порожнини отримано ε_z=-1, а по товщині стінки виникають розтягувальні деформації ε_z. Радіальні деформації, що наведені на рис. 7,*б*, у циліндричній і конусній частинах стінки є стискаючими і сягають величини ε_r=-0,88 у шарах металу зі сторони порожнини та змінюються по товщині в напрямку бокової поверхні до величини ε_r = -0,4. В області донної частини поблизу вісі симетрії виникають розтягувальні радіальні деформації у межах ε_r = 0,3 ÷ 0,8. Тангенціальні деформації у стінці і у донній частині під торцем пуансону є також розтягувальними (рис. 7, *в*). При цьому у шарах металу стінки біля зовнішньої поверхні вони отримано величину ε_θ = 0,3 з поступовим збільшенням до ε_θ = 1,2 в шарах металу зі сторони порожнини. По об'єму донної частини ці дефо-

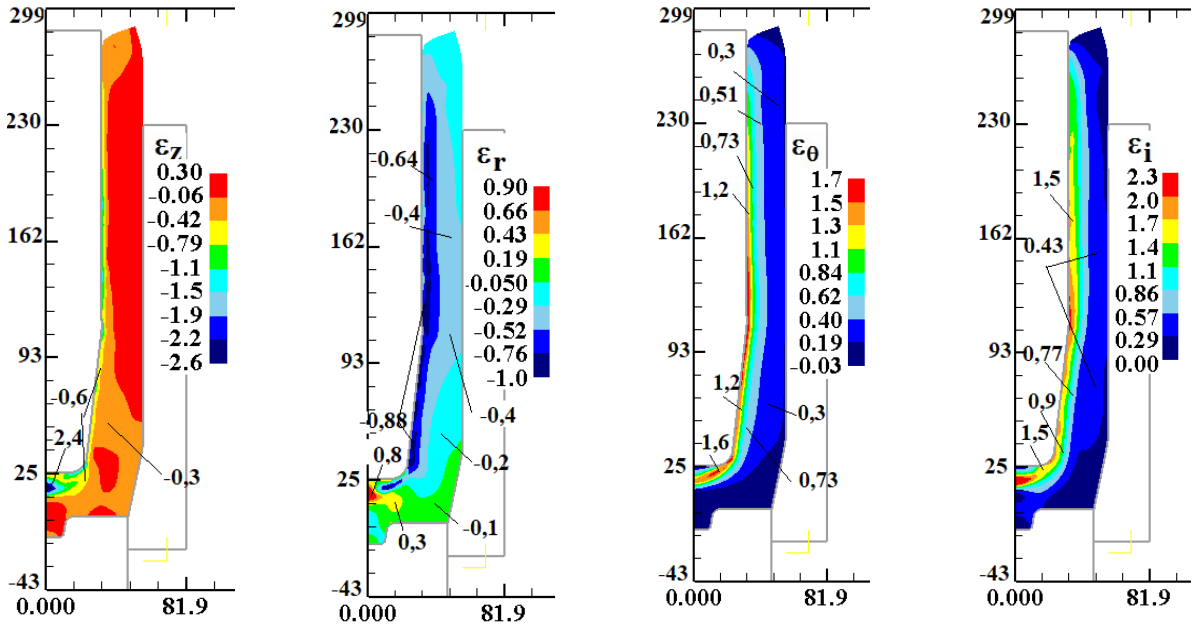
рмації отримано у межах ε_θ = 0,05 ÷ 1,6, а у виступі донної частини такі деформації є стискаючими та сягають величини ε_θ = -0,14. Пропрацювання структури металу гарячою пластичною деформацією можна оцінити з розподілу інтенсивності деформацій ε_i, який наведено на рис. 7, *г*. По ширині циліндричної і конусної частин стінки має місце інтенсивне пропрацювання у шарах металу зі сторони порожнини (ε_i = 1,2) з подальшим зменшенням по ширині стінки до ε_i = 0,43 в шарах металу біля зовнішньої поверхні. Також інтенсивне пропрацювання відбувається в донній частині під торцем пуансона. Тут величини деформації знаходяться у межах ε_i = 0,43 ÷ 2,1. У виступі донної частини отримано ε_i = 0,11 ÷ 0,37. Формоутворення одночасним видавлюванням з осаджуванням призводить до більш інтенсивного пропрацювання структури металу в цілому та отримання більш рівномірного розподілу інтенсивності деформацій по ширині стінки виробу.



а *б* *в* *г*

Рис. 6. Розподіли компонент напружень у здеформованій заготовці в кінці видавлювання з осаджуванням:

а – розподіл σ_z, *б* – розподіл σ_r, *в* – розподіл σ_θ, *г* – розподіл σ_i



а *б* *в* *г*

Рис. 7. Розподіли кінцевих осьових ε_z, радіальних ε_r, тангенціальних ε_θ та інтенсивності ε_i деформацій після видавлювання з осаджуванням:

а – розподіл ε_z, *б* – розподіл ε_r, *в* – розподіл ε_θ, *г* – розподіл ε_i

ВИСНОВКИ

Наведено результати скінченно-елементного моделювання по визначенню впливу швидкості деформування величиною 50, 100, 150, 200, 300 і 400 мм/сек на процес гарячого формоутворення одночасним зворотним видавлюванням з осаджуванням осесиметричного порожнистого виробу із високовуглецевої сталі. Встановлено силові режими вказаних процесів, розподіли питомих зусиль на інструменті, що деформує. Зростанням швидкості деформування з 50 до 200 мм/сек призводить до значного зменшення зусилля формоутворення. Подальше збільшення швидкості практично не впливає на величину зусилля. Для кінцевої стадії видавлювання з осаджуванням встановлено розподіли температури, компонент напружень і деформацій у металі здеформованої заготовки. Визначено температуру охолодження в шарах металу, розташованих поблизу контактуючих поверхонь з інструментом.

Встановлено кінцеві форма та розміри виробу. Для одержання рівного торця стінки необхідна додаткова операція його підрізання. Проробку структури металу гарячою пластичною деформацією оцінено за величиною інтенсивності деформацій у стінці та донній частині виробу. Одночасне формоутворення зворотним видавлюванням з осаджуванням призводить до більш інтенсивного пропрацювання структури металу пластичною деформацією і знижує нерівномірність інтенсивності деформацій по ширині стінки виробу.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Aliev I. S. Radial extrusion processes. *Soviet Forging and Metal Stamping Technology (English Translation of Kuznechno-Shtampovochnoe Proizvodstvo)*. 1988. Part 3. pp. 54–61. ISSN: 0891-334x

2. Алиева Л. И. Совершенствование процессов комбинированного выдавливания: монография. Краматорск: ООО «Тираж - 51». 2018. 352 с. ISBN 978-966-379-846-2.

3. Bhaduri A. Extrusion. In: Mechanical Properties and Working of Metals and Alloys. *Springer Series in Materials Science*. 2018. 264, pp. 599-646. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-10-7209-3_13

4. Алієв І. С., Грудкіна Н. С., Малій Х. В., Таган Л. В. Моделювання та розробка процесів точного штампування видавлюванням: монографія. Краматорськ : ДДМА. 2021. 210 с. ISBN 978-617-7889-08-2.

5. Ковка и штамповка*:* Справочник в 4-х. т. Москва: Машиностроение. 1986. Т.2. Горячая объемная штамповка. Под ред. Е. И. Семенова. 1986. 592 с.

6. Гусинский В. И., Мулин В. П., Новиков В. В. Влияние скорости деформирования на усилие холодного обратного выдавливания. В кн. *Совершенствование процессов и оборудования для холодного деформирования*. Воронеж: ЭНИКМАШ. 1978. С. 19–23.

7. Neugebauer R., Bouzakis K.-D., Denkena B., et all. Velocity effects in metal forming and machining processes. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. 2011. 60, pp. 627–650.

8. Aliiev I., Kaliuzhnyi V., Levchenko V., Aliieva L. et al. The Determination of deformation velocity effect on cold backward extrusion processes with expansion in the movable die of axisymmetric hollow: *collective monograph "Mehatronics"*. Vol. II. London: Taylor & Francis Group, CRC Press, Balkema book, 2021, pp. 81–100. ISBN: 978-1-032-10585-7. DOI: 10.1201/9781003225447

9. Данченко В. Н., Миленин А. А, Кузьменко В. И. Компьютерное моделирование процессов обработки металлов давлением. Численные методы. Днепропетровск: Системные технологии. 2008. 448 с.

10. Kaliuzhnyi V. L., Alieva L. I., Kartamyshev D. A., Savchinskii I. G. Simulation of cold extrusion of hollow parts, *Metallurgist.* 2017. 61. 5-6, pp. 359-365. DOI: https://doi.org/10.1007/s11015-017-0501-1

11. Алиев И. С., Жбанков Я. Г. Методы расчета процессов горячего пластического деформирования и совершенствование технологий ковки крупных поковок: монография. Краматорск : ДДДМА. 2020. 192 с. ISBN 978-966-379-910-0

12. Калюжный В. Л., Ярмоленко О. С., Малій Х. В. Гаряче штампування сталевих порожнистих виробів з інтенсивною пластичною деформацією стінки і донної частини. *Обработка материалов давлением*. Краматорск : ДГМА. 2020. 1 (50). С. 98–103.

13. Алієва Л. І., Калюжний В. Л., Картамишев Д. О., Моісєєва А. М., Сивак Р. І. Дослідження напруженодеформованого стану порожнистих виробів при комбінованому видавлюванні з роздачею. *Обработка материалов давлением*. Краматорск : ДГМА, 2019. 2 (49). С. 14–22.

REFERENCES

1. Aliev I.S. Radial extrusion processes. *Soviet Forging and Metal Stamping Technology (English Translation of Kuznechno-Shtampovochnoe Proizvodstvo)*. 1988. Part 3. pp. 54–61. ISSN: 0891-334x

2. Aliieva L. I. Improvement of combined extrusion processes: monograph. Kramatorsk: LLC "Tiraj – 51". 2018. 352 p. ISBN 978-966-379-846-2. (*in Russian*).

3. Bhaduri A. Extrusion. In: Mechanical Properties and Working of Metals and Alloys. *Springer Series in Materials Science*. 2018. 264, pp. 599-646. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-10-7209-3_13

4. Aliiev I.S., Hrudkina N.S., Malii Kh.V., Tahan L.V. Modeling and development of the processes of precise volumetric stamping for various purposes: monograph. Kramatorsk: DSEA, 2021. 210 p. ISBN 978-617-7889-08-2 (*in Russian*).

5. Forging and stamping. Handbook. In 4 t., T. 2. Hot stamping. Ed. Semenov E.I. Moscow: Mechanical Engineering. 1987. 592 p. (*in Russian*).

6. Gusinsky V.I., Mulin V.P., Novikov V.V. Influence of the strain rate on the force of cold reverse extrusion. In book. Improvement of processes and equipment for cold deformation. Voronezh: ENIKMASH. 1978, pp. 19-23. (*in Russian*).

7. Neugebauer R., Bouzakis K.-D., Denkena B., et all. Velocity effects in metal forming and machining processes. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. 2011. 60, pp. 627–650.

8. Aliiev I., Kaliuzhnyi V., Levchenko V., Aliieva L. et al. The Determination of deformation velocity effect on cold backward extrusion processes with expansion in the movable die of axisymmetric hollow: collective monograph "Mehatronics". Vol. II. London: Taylor & Francis Group, CRC Press, Balkema book, 2021, pp. 81–100. ISBN: 978-1-032-10585-7. DOI: 10.1201/9781003225447

9. Danchenko V.N., Milenin A.A, Kuzmenko V.Y. Computer design of processes of treatment of metals pressure. Numeral methods. Dnipropetrovsk: System technologies. 2008. 448 p. (*in Russian*).

10. Kaliuzhnyi V. L., Alieva L. I., Kartamyshev D. A., Savchinskii I. G. Simulation of cold extrusion of hollow parts, *Metallurgist.* 2017. 61. 5-6, pp. 359-365. DOI: https://doi.org/10.1007/s11015-017-0501-1

11. Aliiev I.S., Zhbankov Ya.G. Methods for calculating the processes of hot plastic deformation and improving the technology of forging large forgings: a monograph. Kramatorsk: DDDMA. 2020. 192 p. ISBN 978-966-379-910-0 (*in Russian*).

12. Kaliuzhnyi V. L., Yarmolenko O. S., Malii Kh. V. Hot stamping of steel empty molds with intense plastic deformation of the wall and bottom part. *Materials Working by Pressure*. Kramatorsk: DSEA. 2020. 1 (50), pp. 98–103. (*in Russian*).

13. Aliieva L. I., Kaliuzhnyi V. L., Kartamishev D. O., Moiseeva A. M., Sivak R. I. Follow-up of a stress-strained mill of empty bins with a combined type of injection with distribution. *Materials Working by Pressure*. Kramatorsk: DSEA. 2019. 2 (49), pp. 14–22. (*in Russian*).

Kaliuzhnyi V. L., Levchenko V. M., Yarmolenko O. S., Tahan L. V. The influence of the deformation rate on the hot extrusion of axisymmetric hollow product

The influence of the deformation rate on the process of hot backward extrusion with a setting made of high-carbon steel of an axisymmetric hollow product with a projection on the end of the bottom part was studied using finite element modeling. The speed of movement of the punch varied from 50 to 400 mm/sec. A computational analysis of the processes of extrusion with setting, the processes of extracting punches from deformed workpieces and the processes of pushing products out of dies was carried out. The dependence of the force of extrusion vs the movement of the punch, the dependence of the force of extraction of the punch vs its reverse movement and the dependence of the force of pushing the product out of the die vs the movement of the knock-out are established. The distribution of specific forces on the ends of the punch and the knock-out and along the height of the die surface are determined by the values of the normal stresses. Increasing in the rate of deformation from 50 to 200 mm/sec leads to a significant decreasing the force of deformation. Further growth of speed practically does not affect the amount of force. Recommendations for choosing press equipment are given. For the final stage of extrusion with setting, temperature distributions, the stress component and deformations in the deformed metal are shown. The cooling temperature in the metal layers located near the contacting surfaces, is determined. The final shape and dimensions of the product are established. To obtain a smooth end of the wall, an additional operation of cutting it is necessary. The processing of the metal structure by plastic deformation is estimated by the magnitude of the intensity of the deformations in the wall and the bottom part of the product. Simultaneously forming by backward extrusion with setting leads to more intensive processing of the metal structure by plastic deformation and reduces the unevenness of the intensity of deformations along the width of the product wall.

Key words: *hot extrusion with setting, hollow product, finite element method, deformation rate, force, temperature, stress, deformation.*

Калюжный В. Л., Левченко В. Н., Ярмоленко А. С., Таган Л. В. Влияние скорости деформирования на горячее выдавливание осесимметричного полого изделия

Моделированием методом конечных элементов изучено влияние скорости деформирования на процесс горячего обратного выдавливания с осадкой из высокоуглеродистой стали осесимметричного полого изделия с выступом на торце донной части. Скорость перемещения пуансона изменялась от 50 до 400 мм/сек. Проведен расчетный анализ процессов выдавливания с осадкой, процессов извлечения пуансонов из деформированных заготовок и процессов выталкивания изделий из матриц. Установлены зависимости усилия выдавливания, от перемещения пуансона, зависимости усилия извлечения пуансона от его обратного перемещения и зависимости усилия выталкивания изделия из матрицы от перемещения выталкивателя. По величинам нормальных напряжений определены распределения удельных усилий на торцах пуансона, выталкивателя и по высоте поверхности матрицы. Увеличение скорости деформирования с 50 до 200 мм/сек приводит к существенному снижению усилия деформирования. Дальнейший рост скорости практически не влияет на величину усилия. Приведены рекомендации по выбору прессового оборудования. Для конечной стадии выдавливания с осадкой показаны распреде-

ления температуры, компонент напряжений и деформаций в деформированном металле. Определена температура остывания в слоях металла, расположенных вблизи контактирующих поверхностей. Установлены конечные форма и размеры изделия. Для получения ровного торца стенки необходима дополнительная операция его подрезки. Проработка структуры металла пластической деформацией оценена по величине интенсивности деформаций в стенке и донной части изделия. Одновременное формообразование обратным выдавливанием с осадкой приводит к более интенсивной проработке структуры металла пластической деформацией и снижает неравномерность интенсивности деформаций по ширине стенки изделия.

Ключевые слова: *горячее выдавливание с осадкой, полое изделие, метод конечных элементов, скорость деформирования, усилие, температура, напряжение, деформация.*

Калюжный Владимир Леонидович – д-р техн. наук, профессор НТУУ
Kaliuzhnyi Vladymyr – Doctor of Technical Sciences, Full Professor of NTUU
Калюжний Володимир Леонідович – д-р техн. наук, проф. НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»
E-mail: kwl_2011@ukr.net
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4904-8879

Левченко Владимир Николаевич – канд. техн. наук, мл. науч. сотр. ИРЭ им. А. Я. Усикова НАНУ
Levchenko Volodymyr – Candidate of Technical Sciences, Junior Researcher of Ya. Usikov IRE of NASU
Левченко Володимир Миколайович – канд. техн. наук, мол. наук. співроб. ІРЕ ім. О.Я. Усикова НАНУ
E-mail: goldangel271@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2411-4198

Ярмоленко Александр Сергеевич – аспирант НТУУ «КПИ им. Игоря Сикорского»
Yarmolenko Oleksandr – aspirant of NTUU
Ярмоленко Олександр Сергійович – аспірант НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»
E-mail: olesboxme@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6568-4963

Таган Любовь Викторовна – канд. техн. наук, ст. препод. ДГМА
Tahan Liubov – PhD, Senior Lecturer of DSEA
Таган Любов Вікторівна – канд. техн. наук, ст. викл. ДДМА
E-mail: l.vik.tagan@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7628-2142

НТУУ – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ
NTUU – National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute named Igor Sikorsky», Kyiv
НТУУ – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», г. Киев

ДДМА – Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ
DSEA – Donbass State Engineering Academy, Kramatorsk
ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск

ІРЕ ім. О.Я. Усикова НАНУ – Інститут радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України, м. Харків
Ya. Usikov IRE of NASU – O. Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics of National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkiv
ИРЭ им. А. Я. Усикова НАНУ – Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова Национальной академии наук Украины, г. Харьков

Статья поступила в редакцию 13.05.22 г.

УДК 620.224:4.001.57 DOI: 10.37142/2076-2151/2022-1(51)55

Тітов В. А.
Назарук Т. О.

РОЗРОБКА МЕТОДУ РОЗРАХУНКУ КРИВИХ ДЕФОРМУВАННЯ ВОЛОКНИСТИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ З МЕТАЛЕВОЮ МАТРИЦЕЮ

Розроблено метод побудови кривих деформування металевих композиційних матеріалів (КМ), які зміцнені безперервними круглими волокнами. Метод враховує механічні властивості структурних компонент (волокна і матриці), їх розміри та взаємне положення в КМ. Враховуючи ортотропність властивостей, метод розповсюджується на деформування волокнистих КМ в умовах лінійного навантаження (розтяг або стиск) в площинах, що перпендикулярні напрямку волокон.

Аналіз процесу деформування волокнистих КМ показує, що при деформуванні виникає суттєва нерівномірність деформацій пластичної матриці. Так, оцінка деформування КМ системи Al-B показує, що при зміні кроку волокон в межах 0,16 – 0,24 мм та діаметрі волокон 0,14 мм величина межі пропорційності композиту становить 0,12 – 0,42 від межі пропорційності матриці.

Отримані залежності, що дозволяють розраховувати криві деформування металевого композиту в пружньопластичній області на основі властивостей матеріалу матриці. Отримані криві деформування для типових КМ систем Al-B для деформацій до 0,5 – 0,6%.

Метод може бути ефективним для прогнозування пластичних властивостей при проектуванні структури нових КМ.

Ключові слова: *волокнисті композиційні матеріали, криві деформування, металева матриця, волокно, деформації, напруження.*

Для розрахунку процесів пластичного формоутворення конструкцій необхідно знати механічні властивості волокнистих композиційних матеріалів (КМ) на металевій матриці (ВМКМ). Основним показником наряду з модулем пружності та границею міцності являється діаграма деформування у вигляді залежності напруження σ від деформації e. Як показано в роботах [1, 2, 3] механічні властивості ВМКМ часто визначають експериментально. Однак, враховуючи невеликий ступінь пластичної деформації до руйнування (0,5 – 0,6%) [4], експериментальні методи мають багато недоліків пов'язаних з використанням спеціальних тензометричних методів та виміром малих величин деформації в широкому діапазоні напружень.

Тому актуальними являються роботи присвячені аналітичному розрахунку кривих деформування ВМКМ в пружньопластичній області.

Метою роботи є розробка методу побудови кривих деформування металевих КМ, які зміцненні круглими волокнами, на основі властивостей структурних компонент (матриці і волокна), їх розмірів та взаємного положення в КМ.

В роботі розглянутий аналітичний метод побудови кривої деформування ВМКМ при випробуваннях на одновісний стиск або розтяг. При цьому вважаємо, що пластичні деформації ВМКМ можуть розвиватися в площині, що перпендикулярна напрямку волокон відносно деформованого стану приймаємо наступні припущення:

1. Деформації вздовж осі волокон відсутні;
2. В силу малості деформацій вважаємо деформований стан лінійним. Деформації розвиваються в напрямку осі прикладання зовнішнього лінійного навантаження.
3. Матеріал матриці пружньопластичний, що зміцнюється за ступеневим законом.

На рис.1. показана схема деформування елементарного об'єму ВМКМ, який містить два волокна з'єднанні матрицею, наприклад для матеріалу ВКА-2. В процесі деформування вважаємо також, що для структурних компонент виконуються наступні умови:

а – волокна ВМКМ являються абсолютно жорсткими по відношенню до матриці, тому що модуль пружності алюмінієвої матриці $E_a = 0,71 \cdot 10^5$ МПа, а борного волокна $E_в = 4,2 \cdot 10^5$ МПа;

б – матеріал матриці пружньопластичний;

в – в процесі розрахунку враховуємо форму граничної поверхні між волокном та матрицею. При цьому вважаємо, що міцність з'єднання на граничній поверхні волокна та матриці достатня для деформування матриці.

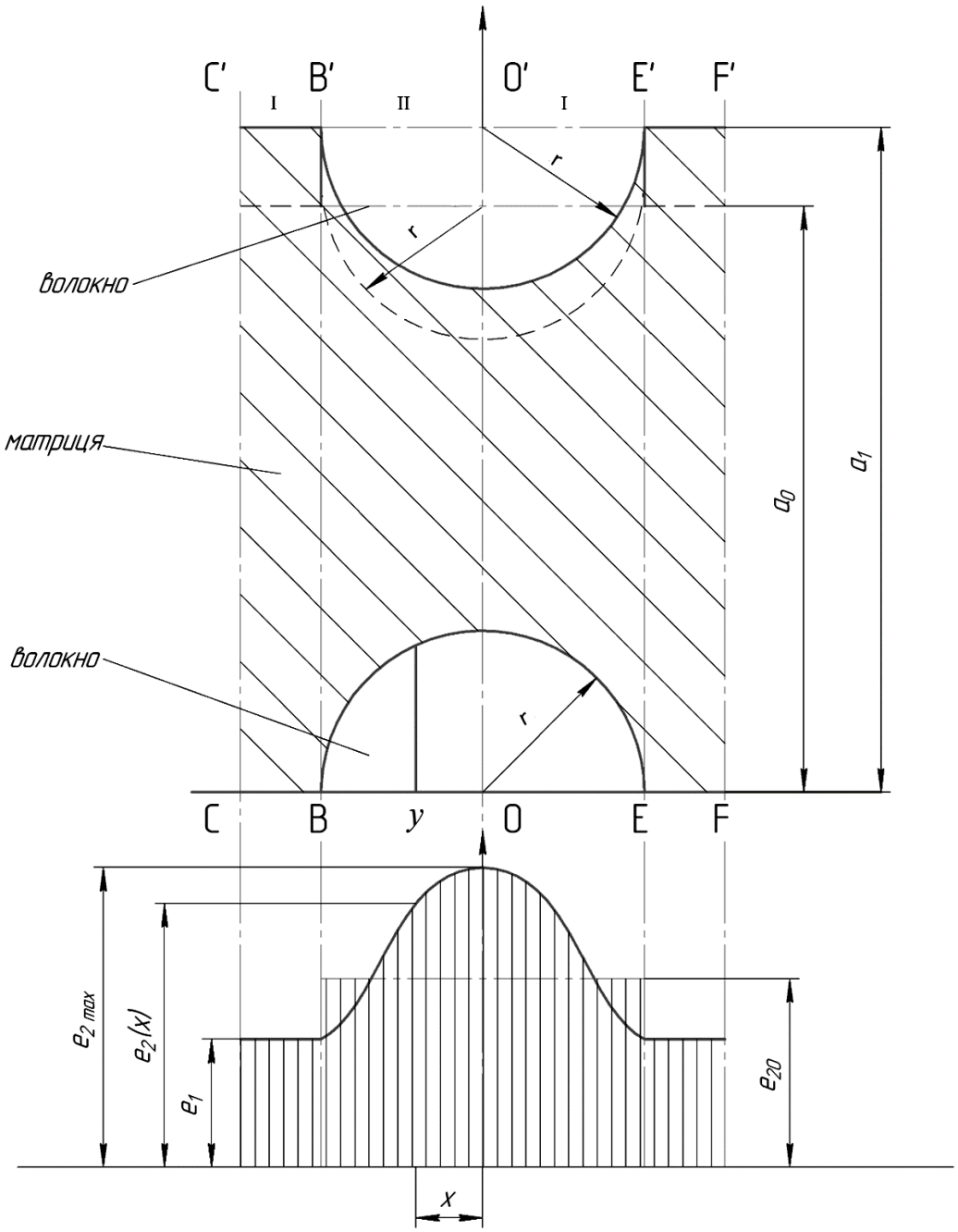


Рис. 1. Формалізоване представлення вихідних даних для розрахунку деформацій матриці ВМКМ (схема деформування елементарного об'єму).

Напруження розтягування в композиційному матеріалі $\sigma_к$ визначаємо у феноменологічній постановці (на макрорівні напруження усереднені рівномірно по площині перерізу) [5]. Тоді при розтягуванні або стисканні зразків можна записати рівняння рівноваги сил у вигляді:

$$\sigma_{\mathrm{k}} = \frac{1}{\mathrm{F_0}}\left[(\mathrm{n}+1)\mathrm{F_1}\sigma_1 + \mathrm{n}\mathrm{F_2}\sigma_2\right], \qquad (1)$$

де F_0 – площа поперечного перерізу зразка;

F_1 і σ_1 – відповідно площа перерізу і напруження в зонах рівномірних деформацій;

F_2 і σ_2 – площа перерізу напруження в матриці між волокнами в моношарах;

n – кількість моношарів волокон.

У (1) нелінійність σ_k спостерігатиметься при нелінійності одного із доданків у квадратних дужках.

У пружній зоні ($e \le e_p$, e_p – величина деформацій в точці переходу від пружних до пластичних деформації) існує лінійна залежність виду $\sigma = Ee$. Для пластичної області приймемо нелінійний, наприклад, ступеневий закон $\sigma = Ke^m$. Тоді величина, що характеризує перехід пружних деформацій у пластичні, для матеріалу матриці визначиться виразом.

$$e_{pm} = \left(\frac{K}{E}\right)^{\frac{1}{1-m}} , \tag{2}$$

де E – модуль пружності;

K і m – константи ступеневої апроксимації і кривої деформування в пластичній області. Враховуючи, що для металевих композитів, що розглядаються, поперечний переріз волокна круглий, то для визначення деформацій в проміжку між волокнами моношару, можна записати

$$e_2 = \ln\frac{a_1 - 2\sqrt{r^2 - x^2}}{a_0 - 2\sqrt{r^2 - x^2}}, \tag{3}$$

де – радіус волокна;

x – відстань від центру волокна до перерізу, що розглядається;

a_0 та a_1 – відстань між волокнами в напрямку деформування, відповідно, до та після деформації.

Рівномірні деформації в шарах без волокон визначаються співвідношенням (4) при $x = r$:

$$e_1 = \ln\frac{a_1}{a_0} \approx \frac{a_1 - a_0}{a_0} \tag{4}$$

Оскільки наявність волокна у матеріалі зумовлює локалізацію деформацій, зазвичай $e_2 > e_1$. З цього випливає, що при рівномірних загальних пружних деформаціях зразка e_1 деформації e_2 можуть перевищувати межу пропорційності e_{cp} і в металевих композитах будуть мати місце пластично деформовані області.

Величина e_1, при якій виникають пластичні деформації e_2 у матриці між волокнами, визначаються величиною межі пропорційності для металевого композиту в цілому:

$$e_{pk} = \frac{e_1}{e_{2max}} e_{pm}, \tag{5}$$

де $e_{2\,max}$ – максимальна величина деформацій між волокнами при $x = 0$.

Після підстановки виразів (2), (3) (4) та заміни логарифму першим членом його розкладання в ряд, отримуємо залежність:

$$e_{pk} = \left(1 - \frac{2r}{a_0}\right)\left(\frac{K}{E}\right)^{\frac{1}{1-m}} \tag{6}$$

Формула (6) показує, що межа пропорційності, обчислена за деформаціями, залежить від механічних властивостей матеріалу матриці та структурних параметрів металевого композиту.

Межа пропорційності, визначена за напруження, з урахуванням (1):

$$\sigma_{\text{пц}} = \frac{E}{\mathrm{F}_0}\left(\frac{K}{E}\right)^{\frac{1}{1-m}}\left[(\mathrm{n}+1)\mathrm{F}_1 + \frac{\mathrm{n}}{2}\mathrm{F}_2\left(1-\frac{2r}{a_0}\right)\right] \quad (7)$$

Оцінки, виконані для типових структур, зокрема, КМ системи Al-B, показують, що при зміні кроку волокон в межах 0,16–0,24 мм та діаметрі волокон 0,14 мм величина межі пропорційності композиту становить 0,12–0,42 від межі пропорційності матриці.

Наведена оцінка деформаційних властивостей демонструє, що з метою підвищення точності діаграми деформування композитів з жорсткими армуючими компонентами їх слід апроксимувати нелінійними функціями. Разом з тим необхідно відзначити, що нехтування лінійною ділянкою деформування навіть при розрахунку інтегральних характеристик процесів (роботи деформування та ін.) не тягне за собою появи великих похибок розрахунку.

Діаграми деформування металевих композитів, зміцнених волокнами круглої форми, можуть бути побудовані аналітично з використанням наступної залежності:

$$\sigma_k = \frac{K}{\delta}\left\{e_1^m(\delta - 2nr) + \left[\frac{1}{r}\int_0^1 \left(\frac{a_1 - a_0}{a_0 - \sqrt{2r^2 - x^2}}\right)^m dx\right] 2nr\right\} \quad (8)$$

На рис. 2. показані діаграми, одержані аналітично.

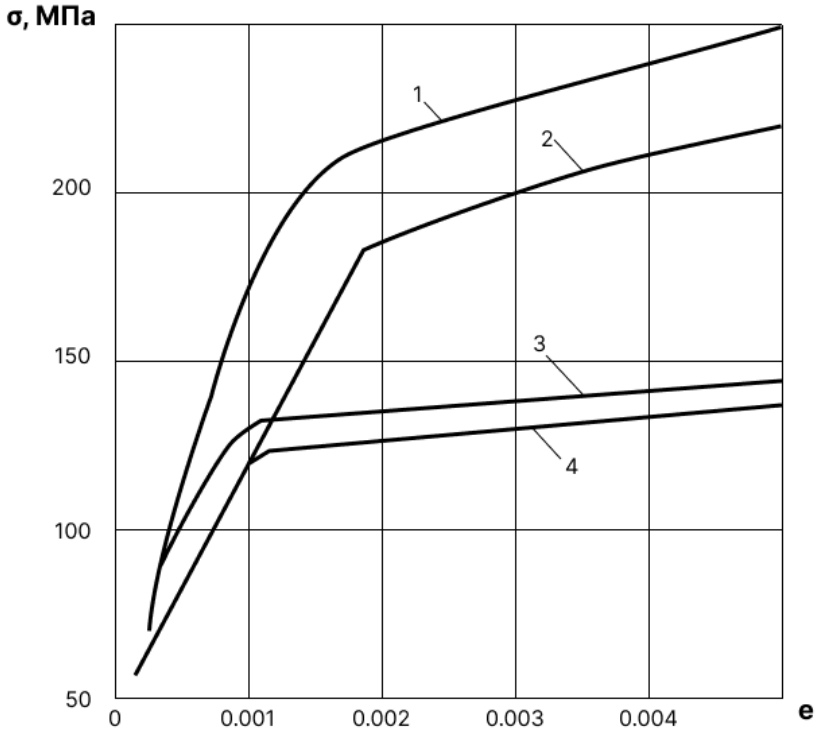


Рис. 2. Діаграми деформування боралюмінієвого композита, отриманих аналітично, та їх порівняння з властивостями відносних сплавів алюмінієвої матриці:

1 – ВМКМ система АМг6-В; 2 – алюмінієвий сплав АМг-6; 3 – ВМКМ система АД33-В; 4 – алюмінієвий сплав АД33

ВИСНОВКИ

1. Розроблено метод побудови кривих деформування металевих композиційних матеріалів, які зміцнені безперервними круглими волокнами. Метод враховує механічні властивості структурних компонент (волокна і матриці), їх розміри та взаємне положення в КМ. Враховуючи ортотропність властивостей, метод розповсюджується на деформування волокнистих КМ в умовах лінійного навантаження (розтяг або стиск) в площинах, що перпендикулярні напрямку волокон. Отримані залежності, що дозволяють розраховувати криві деформування $\sigma - e$ в пружньопластичній області отримані криві деформування для типових КМ систем Al-B.

2. Аналіз процесу деформування волокнистих КМ показує, що при деформуванні виникає суттєва нерівномірність деформацій пластичної матриці. Так, оцінка деформування КМ системи Al-B показує, що при зміні кроку волокон в межах 0,16 – 0,24 мм та діаметрі волокон 0,14 мм величина межі пропорційності композиту становить 0,12 – 0,42 від межі пропорційності матриці.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Композиционные материалы. Справочник. Под ред. Д.М. Карпиноса. Киев: Наукова думка, 1985. 592 с.

2. Композиционные материалы. Т. 8. Анализ и проектирование конструкций. Под ред. Л. Браутмана и Р. Крока. Москва: Мир. 1978. 508с.

3. Кривов Г. А., Титов В. А., Лупкин Б. В. и др. Конструкции из металлических композиционных материалов. Киев: Техніка. 1992. 224 с.

4. Кривов Г. А., Титов В. А., Федоренко Ю. М. Модерирование технологических процессов формообразования деталей из плоских металлополимерных композитов. *Механика композитных материалов.* 1995. 3. С. 417–427.

5. Титов В. А., Митрофанова В. В., Шлянников В. Н. и др. Построение диаграмм деформирования КМ на металлической матрице, упрочненной непрерывными волокнами. *Технология производства деталей из композиционных материалов*. Москва: ВИМИ. 1991. С. 57.

REFERENCES

1. Composite materials. Directory. Ed. D.M. Karpinosa. Kyiv: Naukova dumka. 1985. 592 p. *(in Russian).*

2. Composite materials. T. 8. Analysis and design of structures. Ed. L. Brautman and R. Krok. Moscow: Mir. 1978. 508 p. *(in Russian).*

3. Kryvov G.A., Titov V.A., Lupkin B.V., et al. Structures from metallic composite materials. Kyiv: Technika. 1992. 224 p. *(in Russian).*

4. Kryvov G.A., Titov V.A., Fedorenko Yu.M., et al. Moderation of technological processes of forming parts from flat metal-polymer composites. *Mechanics of composite materials*. 1995. 3, pp. 417-427. *(in Russian).*

5. Titov V.A., Mitrofanova V.V., Shlyannikov V.N. Construction of diagrams of CM deformation on a metal matrix reinforced with continuous fibers. *Technology of production of parts from composite materials*. Moscow: VYMY. 1991, p. 57. *(in Russian).*

Titov V., Nazaruk T. Development of the method for calculating the deformation curves of fiber composite materials with a metal matrix.

A method of constructing deformation curves of metal composite materials reinforced with continuous round fibers has been developed. The method takes into account the mechanical properties of structural components (fibers and matrices), their sizes and relative position in composite materials (CM). Taking into account the orthotropy of the properties, the method is extended to the deformation of fibrous CM under conditions of linear loading (tension or compression) in planes perpendicular to the direction of the fibers.

The analysis of the process of deformation of fibrous CM shows that during deformation there is a significant non-uniformity of deformations of the plastic matrix. Thus, the evaluation of the deformation of the CM of the Al-B system shows that with a change in the fiber pitch within 0.16-0.24 mm and a fiber diameter of 0.14 mm, the value of the limit of proportionality of the composite is 0.12-0.42 of the limit of proportionality of the matrix.

The obtained dependencies allow calculating the deformation curves of the metal composite in the elastoplastic region based on the properties of the matrix material. Deformation curves obtained for typical Al-B CM systems for deformations up to 0.5–0.6%.

The method can be effective for predicting plastic properties when designing the structure of new CMs.

***Key words**: deformation curves, fibrous composite materials, metal matrix, fiber, deformations.*

Титов В. А., Назарук Т. А. Разработка метода расчета кривых деформирования волокнистых композиционных материалов с металлической матрицей

Разработан метод построения кривых деформирования металлических композиционных материалов (КМ), укрепленных непрерывными круглыми волокнами. Метод учитывает механические свойства структурных компонентов (волокна и матрицы), их размеры и взаимное положение в КМ. Учитывая ортотропность свойств, метод распространяется на деформирование волокнистых КМ в условиях линейной нагрузки (растяжение или сжатие) в плоскостях, перпендикулярных направлению волокон.

Анализ процесса деформирования волокнистых КМ показывает, что при деформировании возникает существенная неравномерность деформаций пластической матрицы. Так, оценка деформирования КМ системы Al-B показывает, что при изменении шага волокон в пределах 0,16-0,24 мм и диаметре волокон 0,14 мм величина предела пропорциональности композита составляет 0,12–0,42 от предела пропорциональности матрицы.

Получены зависимости, позволяющие рассчитывать кривые деформирования металлического композита в упругопластической области на основе свойств материала матрицы. Получены кривые деформирования для типичных систем КМ Al-B для деформаций до 0,5 –0,6%.

Метод может быть эффективен для прогнозирования пластических свойств при проектировании структуры новых КМ.

Ключевые слова: *композиционные волокнистые материалы, кривые деформирования, металлическая матрица, волокно, деформации, напряжения.*

Тітов В'ячеслав Андрійович – д-р техн. наук, професор, НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»
Titov Viacheslav – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute
Титов Вячеслав Андреевич – д-р техн. наук, профессор, НТУУ «КПИ им. Игоря Сикорского»
E-mail: vat.kpi@gmail.com
ORCID: 0000-0002-4234-6961

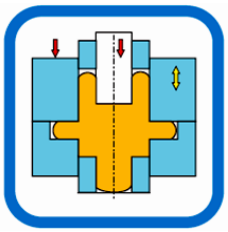
Назарук Тетяна Олександрівна – магістрант, НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»
Nazaruk Tetiana – Master Student, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute
Назарук Татьяна Александровна – магистрант, НТУУ «КПИ им. Игоря Сикорского»
E-mail: divateese@icloud.com

НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського» – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна

Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute – National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine.

НТУУ «КПИ им. Игоря Сикорского – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», г. Киев, Украина.

Стаття надійшла до редакції 10.05.22 р.



РОЗДІЛ ІІ
ПРОЦЕСИ ОБРОБКИ ТИСКОМ У МАШИНОБУДУВАННІ

УДК 621.735.3

DOI: 10.37142/2076-2151/2022-1(51)61

Марков О. Є.
Хващинський А. С.
Мусорін А. В.
Лисенко А. А.
Молодецький В. В.

ДОСЛІДЖЕННЯ НОВОГО СПОСОБУ КУВАННЯ ВЕЛИКИХ ЗЛИТКІВ НА ОСНОВІ ОСАДЖЕННЯ ЗАГОТОВОК З УСТУПАМИ

У роботі запропоновано та досліджено новий спосіб осадження заготовок з конічними виступами. Відносна висота заготовки перед осадкою становила H / D = 3,0. Напружено-деформований стан (НДС) досліджено для визначення рівня та знаку стискаючих напруг у заготовці. Крім того, оцінено параметр напруженого стану в місці розташування осьових дефектів. Визначено ступінь змикання осьового дефекту та величину опуклості. Ці параметри були визначені для різних розмірів діаметрів і висоти. Встановлено, що осадка заготовки з конічними виступами призводить до рівномірного розподілу деформації в тілі заготовки. Під час осадки на бічній поверхні і в осьовій зоні виникають стискаючі напруги внаслідок появи увігнутої форми заготовки. Крім того, спостерігається зменшення розмірів осьових дефектів і опуклість бічної поверхні. Визначено ефективні геометричні параметри заготовки. Встановлено, що зменшення діаметра та збільшення висоти уступів призводить до зменшення опуклості в досліджуваному діапазоні розмірів заготовки. Опуклість збільшується при зменшенні діаметра уступів. «Діжка» розплющується і при подальшій осадці бічна поверхня заготовки набуває форми, наближеної до циліндричної. Відносний діаметр і висота виступів повинні бути d/D = 0,5…0,7 і h/D = 0,4…0,6 відповідно задля закриття дефектів під час осадки. Рекомендований ступінь осадки 50 %. Визначені рекомендації перевірені експериментально під час кування зливка масою 66 500 кг. Отримані експериментальні дані підтвердили результати моделювання методом скінченних елементів (МСЕ). Результати дослідження впроваджено в промисловість.

Ключові слова: *кування, злиток, осадка, осьові дефекти, конічні виступи, закриття дефектів, стискаючі напруги, опуклість*

Останнім часом зростає кількість поковок, виготовлених зі зливків. Це викликано збільшенням потужності важких машин. Низька якість виготовлених поковок пояснюється низькою якістю вихідних зливків [1, 2]. Брак при ультразвуковому контролі (УЗК) після кування великих поковок досягає 10 % [3]. Відмова по УЗК пояснюється осадкою злитків з неоднорідною структурою. У результаті ця структура пропрацьовується неоднорідно і в недостатній мірі [4]. Крім того, збільшення осьових дефектів зливка відбувається при осадці циліндричних заготовок плоскими плитами. Аналіз процесів кування з використанням осадки дозволив встановити, що традиційна схема кування не гарантує подрібнення структури зливка, а також забезпечення специфічних властивостей одержуваних деталей [5].

Високу якість одержуваних заготовок важливо отримати при виготовленні великих поковок відповідального призначення. Якість великих поковок визначається відсутністю внутрішніх і зовнішніх дефектів, а також однорідністю механічних властивостей. Ці вимоги зумовлені тим, що заготовкою є злиток [6]. Великі злитки характеризуються дефектами металургійного походження (осьова пористість, усадка та ін.). Ці дефекти зумовлюють низьку якість кованих зливків. Утворення тріщин на бічній поверхні заготовки часто виникає під час деформації легованої сталі. Крім того, злитки кування мають внутрішню неоднорідну структуру, зумовлену умовою кристалізації. Відсутність осьових і зовнішніх дефектів, а також усунення

неоднорідності структури можна забезпечити куванням в гарячому стані. Осьові дефекти злитка усуваються закриттям порожнини під дією напруги стиску при гарячій деформації. Під час кування необхідно забезпечити відповідний напружений стан. Ступінь структури фрагментації можна оцінити за допомогою величини та градієнта деформації в кованій частині. Змінювати напружено-деформований стан (НДС) у деформованій деталі можна за допомогою спеціальної форми заготовки та деформаційного інструменту, а також технологічних режимів кування [7]. Існує велика кількість методів кування, які спрямовані на підвищення якості великих кованих деталей для відповідальних цілей. Ці методи засновані на застосуванні нових ковальських операцій (осадка, протяжка та ін.) і спеціального деформуючого інструменту. Основний інтерес представляє операція осадки великих зливків. Це основна операція для підвищення якості поковок [8]. Відомо багато методів кування, які були спрямовані на підвищення якості великих поковок відповідального призначення. Ці способи засновані на використанні нових операцій кування (осадка, протяжка та ін.) і спеціальних інструментів деформування. Основний інтерес представляє операція осадки великих зливків. Ця операція є основною для підвищення якості поковки [8].

У виробництві традиційно використовується операція осадки циліндричних заготовок. Цей метод характеризується несприятливим НДС для закриття внутрішніх дефектів і нерівномірним розподілом деформацій. Огляд літератури показав, що існує багато методів осадки великих заготовок. Дослідження, які показали вплив різних методів осадки на закриття внутрішніх дефектів, а також на розподіл деформації в тілі заготовки, необхідно проаналізувати перед використанням нового методу осадки. Значне збільшення зони ліквації в осьовій частині зливка може бути підставою для застосування операції осадки [9]. Проте автори роботи не досліджували способи осадки профільованих заготовок для зміни НДС поковки під час деформації.

Метою дослідження є визначення ефективної геометрії заготовок з конічними виступами, що забезпечують рівномірний деформований стан, високий рівень стискаючих напружень, а також закриття осьових дефектів при осадці. За результатами досліджень необхідно визначити ефективну форму і розміри заготовок з конічними виступами.

Для вирішення зазначеної мети в роботі поставлені наступні задачі:

- розробити методику досліджень операцій осадження заготовок;
- розробити новий науково-обґрунтований спосіб осадження заготовок, який підвищує щільність будови поковок;
- на основі проведених комплексних теоретичних і експериментальних досліджень розробити технологічні та конструкторські рекомендації з проектування техпроцесів деформування за новими схемами деформування.

Чисельна модель процесу деформування базується на теорії течії. Матеріалом заготовки вважається нестисливе пружнопластичне тіло.

Дискретизація наведених вище рівнянь базується на принципі віртуальних швидкостей і операцій. Невідомими є вузлові значення швидкостей і середні напруження. Скінчено-елементна сітка складалася з лінійного чотиригранного тетраедра. Заготовка з конічними виступами представлена на рис. 1. Зовнішній діаметр заготовки – D, загальна висота – H, діаметр і висота конічних виступів – d і h відповідно. Початковий діаметр осьового дефекту (do) дорівнював 10 % діаметра заготовки.

Швидкості деформації та коефіцієнт тертя були сталими. Ефективність осадки заготовки буде визначатися висотою конічних виступів, оскільки в цих частинах почнеться деформація металу за законом найменшого опору деформації. Низькі конічні виступи ($h/D < 0,2$) будуть аналогічні схемі осадки циліндричної заготовки. Високі конічні виступи ($h/D < 0,6$) значно збільшать загальну висоту заготовки та виникнуть вигини під час осадки. Тому для цього фактора було обрано інтервал від 0,2 до 0,6 (табл. 1).

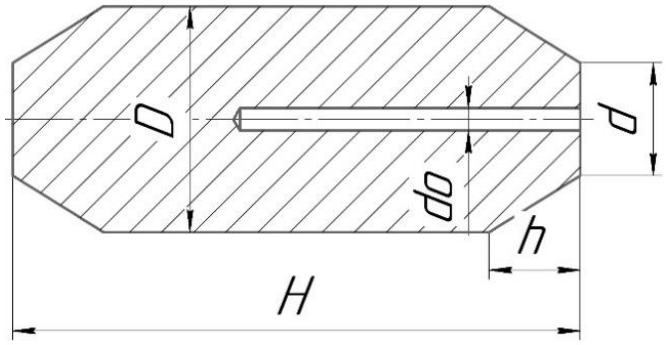


Рис. 1. Креслення заготовок з конічними виступами

Основними факторами, що впливають на формозмінення, напружено-деформований стан та закриття внутрішніх дефектів під час осадки, є відносні діаметри (*d/D*) і відносна висота (*h/D*) конічних уступів.

Діаметр торців заготовки впливає на площу контакту з плитами, а відповідно і на розмір зони з мінімальною деформацією. Збільшення діаметрів конічних виступів ($d/D > 0{,}9$) буде аналогічно схемі осадки циліндричних заготовок. Малі діаметри конічних виступів ($d/D < 0{,}5$) зменшать стійкість заготовок на плоских плитах. Тому для цього фактору було обрано інтервал від 0,5 до 0,9 (табл. 1).

Таблиця 1

Основні фактори та рівні варіації під час моделювання

№	Рівні факторів	
	d/D	h/D
1	0.5	0.2
2	0.7	0.2
3	0.9	0.2
4	0.5	0.4
5	0.7	0.4
6	0.9	0.4
7	0.5	0.6
8	0.7	0.6
9	0.9	0.6

Моделювання процесу осадження профільованих на чотирипроменевий переріз заготовок проводилось методом скінчених елементів (МСЕ). За результатами моделювання встановлювалось формозмінення штучного дефекту після деформування. Після профілювання усі заготовки осаджувалися на 50 %.

Матеріал модельованих заготовок 50Cr5Mo; температура нагріву заготовок і деформаційного інструменту становили 1180˚С і 150˚С відповідно; швидкість деформування v = 40 мм/с; ступінь осадки склав 60 %. Коефіцієнт тертя між заготовкою та плитами за Зібелем становив μ = 0,35. Діаметр і висота заготовок становили D = 1000 мм і H = 3000 мм відповідно. Кількість скінченних елементів становила 40 000. Напруження течії для сталі 50Cr5Mo в гарячому стані показано на рис. 2. Для МСЕ моделювання використовували 2D модель, оскільки процес осадки є вісесиметричною задачею.

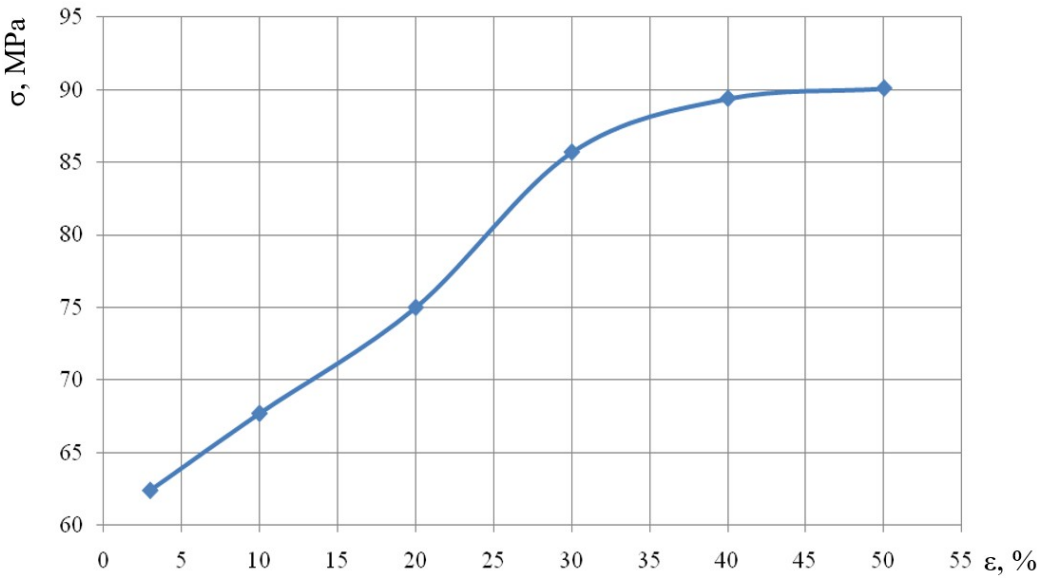


Рис. 2. Напруга течії сталі 50Cr5Mo при температурі 1180 ˚С

Основним параметром кування великого злитка є нерівномірність розподілу деформацій в поковці. Оскільки деформація може свідчити про подрібнення внутрішньої литої структури злитка. Простим критерієм оцінки нерівномірності розподілу деформації є різниця між максимальною та мінімальною ефективними деформаціями в тілі деталі $\Delta e = e_{max} - e_{min}$). Однак цей критерій не враховує значення та розміри кожної зони конкретної деформації, але ці дані дуже важливі для аналізу результатів розподілу деформацій. Дані розмірної ділянки з питомою деформацією дозволять оцінити рівень і об'єм литої структури помелу злитка. Більш точною формулою для оцінки максимального подрібнення структури металу є середньозважена еквівалентна деформація.

Перевагою середньозваженої деформації є врахування площі кожної зони з певною деформацією, інакше оцінка деформованого стану буде неадекватною.

Підвищення рівня стискаючих напружень в осьовій зоні заготовки можливо за допомогою підпору з боку бічної поверхні заготовки. Перспективним рішенням цієї проблеми є використання заготовок з конічними виступами перед осадкою.

Утворення увігнутої поверхні при осадці підвищує рівномірність розподілу деформацій і забезпечує підпор в осьовій зоні. Цей аспект сьогодні не досліджувався і немає конкретних рекомендацій щодо раціональної геометрії таких заготовок до осадки.

НДС досліджуваних заготовок під час осадки визначали за середніми напруженнями в поздовжньому перерізі. У центральній зоні максимальні напруги стиску не виникають. Площа зони із середніми напруженнями від –10 до –20 МПа незначна і становить від 10 до 20 % загальної площі перетину. Загальний рівень середніх напружень зі знаком «мінус» в тілі заготовки низький. Проте значна глибина увігнутої бічної поверхні формується в центральній частині заготовки шляхом утворення подвійної «бочки» з уступів заготовки. Цей результат збігається з відомими даними для класичної осадки високих заготовок із співвідношенням *H/D* > 2,5.

Відповідно до досліджуваних завдань необхідно визначити напружений стан у місці розташування осьового дефекту заготовки на половині висоти заготовки. Це дозволить визначити механізм зміни розмірів дефекту. Механізм закриття дефекту можна описати параметром напруженого стану η. Цей параметр показує, наскільки середні напруги перевищують еквівалентні напруги, а також знак цих напруг.

За результатами досліджень визначено знак і величину напружень на бічній поверхні заготовки. Параметр напруженого стану (η) на середній периферійній частині заготовки розраховували залежно від ступеня деформації ($\varepsilon_H = \Delta h/H_0$) для різних діаметрів конічних виступів (*d/D*) та відносної висоти заготовки. конічні уступи *h/D* = 0,6 (рис. 4). Літературні дані свідчать про те, що зміна відносної висоти уступів не робить істотного впливу на параметр η. Тому цей параметр

у роботі не досліджувався.

Аналіз отриманих результатів дозволяє визначити, що після обсадки заготовки конічними виступами більше ніж на 50 % параметр η має позитивне значення. Це підтверджує виникнення несприятливих умов під час осадки високих заготовок (рис. 3).

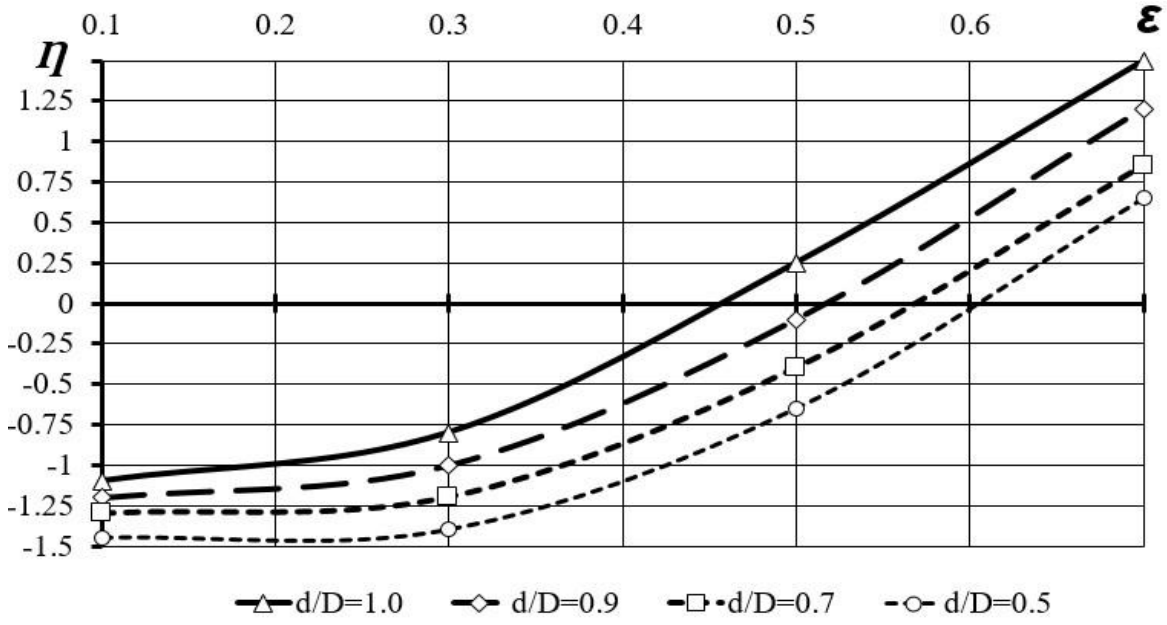


Рис. 3. Параметр напруженого стану в залежності від ступеня деформації (ε) при різних діаметрах уступів (d/D) (відносна висота конічного уступу h/D = 0,6)

Зони з мінімальними деформаціями, розташовані біля уступів, мають однакові форми та розміри при однакових діаметрах уступів (d/D). Це пояснюється тим, що ці зони мають однакові площі контакту заготовки з плитами.

Отримані результати пояснюються даними середньозважених деформацій (рис. 4). Рівень цих деформацій низький. Зменшення відносної висоти конічних уступів (h/D) призводить до зменшення рівня деформацій.

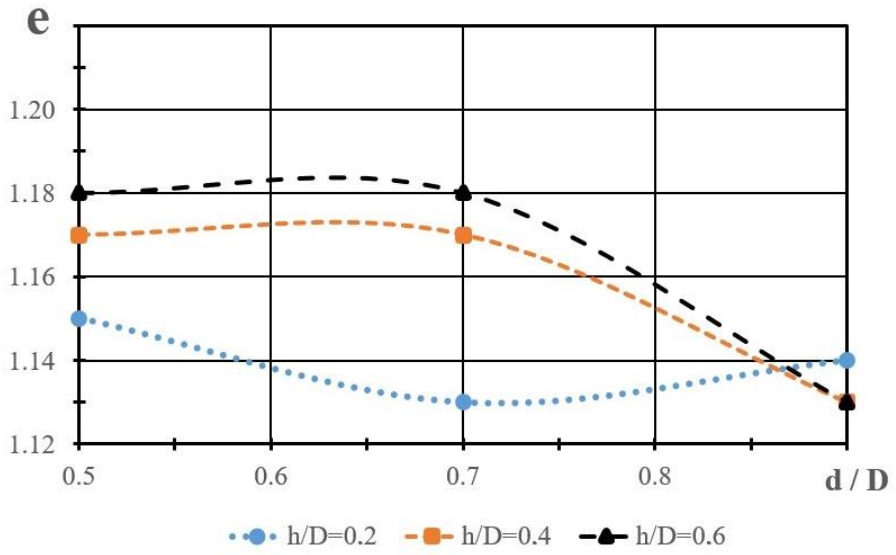


Рис. 4. Середньозважена деформація для різної відносної висоти (h/D) і діаметра (d/D) конічних виступів

Зміна розмірів і форми осьового дефекту при осадці з різними відносними діаметрами

і висотою конічних виступів представлені на рис. 5. Ці результати дозволяють визначити ступінь закриття осьового дефекту. На підставі аналізу отриманих результатів для заготовок з конічними виступами зроблено висновок, що повного закриття дефекту не відбувається. Спільною рисою досліджуваних схем є більш інтенсивне закриття дефектів у зонах між уступами та центральними частинами заготовки. Однак ступінь закриття дефекту для кожної деформації схеми різний. Мінімальне закриття дефекту виникає при осадці заготовки за формою, подібною до циліндричної (d/D = 0,9). Це пояснюється осадкою майже циліндричної заготовки. У цьому випадку відсутній підпор з боку бічної поверхні. Це призвело до радіальної течії металу зі збільшенням діаметрів заготовки та дефекту. Закриття дефекту відбувається інтенсивніше, ніж при осадці конічними виступами при його відносних діаметрах d/D = 0,5…0,7.

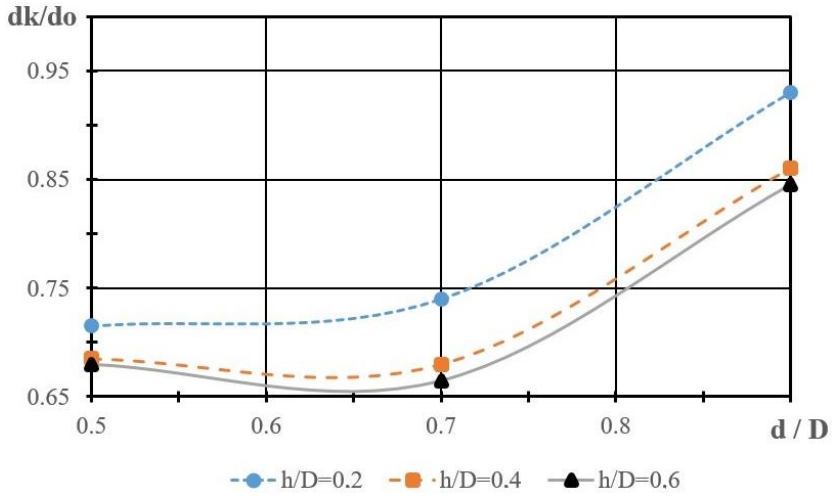


Рис. 5. Зміна відносного діаметра дефекту після осадки на 50 % в залежності від відносного діаметра виступу (d/D) і висоти (h/D) конічного виступу

Опуклість бічної поверхні збільшує об'єм металу заготовки. Цей метал буде втрачений під час механічної обробки. Досліджені процеси осадки можуть зменшити опуклість і витрату металу. Тому додатково розраховувався параметр діжкоподібності Q. На основі цього параметра розраховано опуклість досліджуваних схем деформування. Розраховано графік опуклості залежно від відносного діаметра (d/D) і висоти (h/D) уступів після обсадки на 50 % (рис. 6).

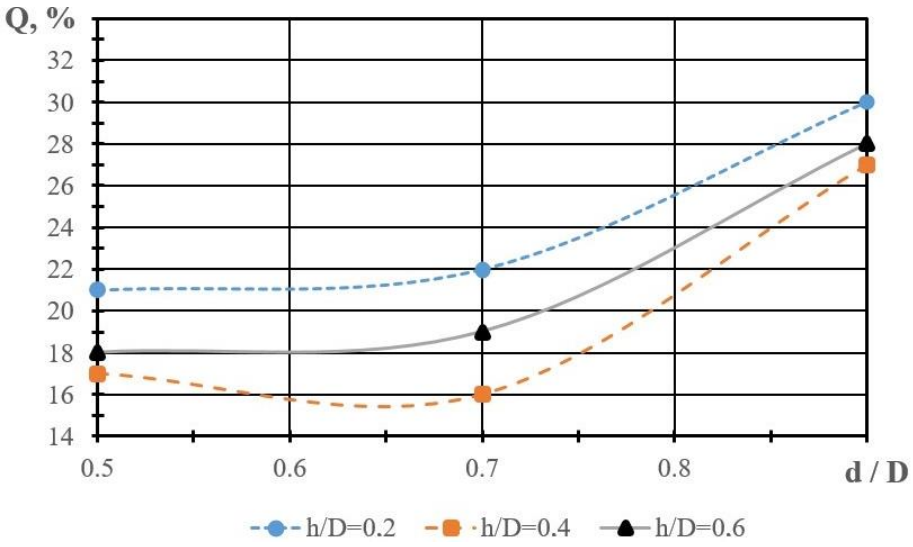


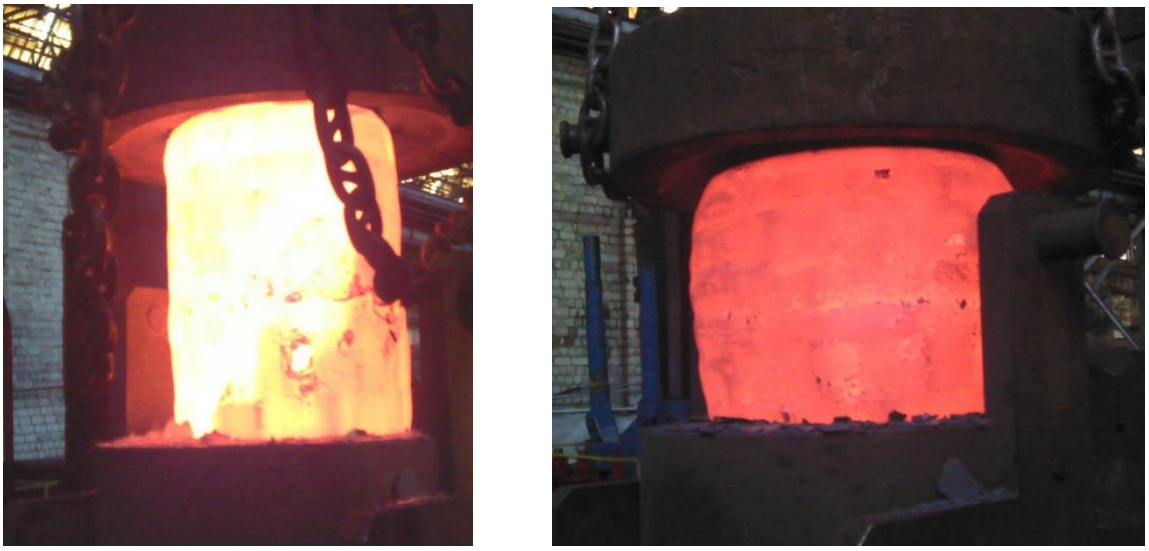
Рис. 6. Опуклість залежно від відносних діаметрів (d/D) і висоти (h/D) конічних виступів після осадки на 50 %

Отримані результати моделювання МСЕ необхідно перевірити шляхом експериментального дослідження. Для отримання більш точних результатів дослідження кування злитків необхідно проводити в промислових умовах. Експерименти на реальних заготовках дозволять отримати більш точний результат, ніж експерименти на зменшених моделях. При цьому будуть враховані всі фактори, що впливають на процес кування (тепловий стан, коефіцієнт тертя тощо). На менших моделях важко забезпечити реальне теплове поле під час гарячої деформації.

Експериментальне дослідження виконано на заготовці, яка за формою, розмірами, матеріалами та термошвидкісним режимом деформації повністю відповідала заготовці з моделювання МСЕ. Експеримент проводився на зливку масою 66 500 кг зі сталі 50Cr5Mo. Злиток після нагріву до температури 1180°С профілювали для отримання конічних виступів (рис. 7). Відносний діаметр і висота конічних виступів дорівнювали d/D = 0,6 і h/D = 0,6 відповідно. Ці геометричні параметри визначені як оптимальні за результатами теоретичних досліджень щодо закриття осьових дефектів і рівномірного розподілу деформацій при осадці. Після профілювання та нагріву злиток осаджували плоскою верхньою матрицею (рис. 9).

Рис. 7. Осадка заготовок з уступами плоскими плитами

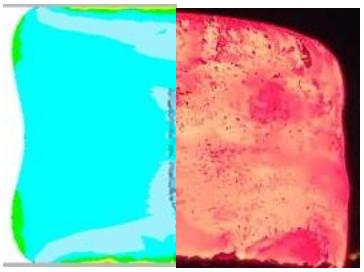
Осадка заготовок із більшим діаметром (d/D = 0,9) і меншою висотою (h/D = 0,2) конічних виступів (рис. 8, а) призвела до інших результатів. А саме, при осадці така заготовка має явну опуклість на бічній поверхні («діжка») (рис. 8, б), що перевищує розміри, отримані при осадці в попередньому випадку (з конічними виступами d/D = 0,6, а h/D = 0,6). Це додатково підтверджує ефективність визначених вище геометричних параметрів конічних виступів.



а) б)

Рис. 8. Осаджена заготовка з діаметром і висотою конічних виступів d/D = 0,9 h/D = 0,2 відповідно

Мінімальна опуклість відповідає уступам з відносною висотою *h/D* 0,6. Це пояснюється локалізацією деформацій у виступах з утворенням «подвійної діжки» з глибокою увігнутістю. Діаметр і довжина виступів заготовки впливають на формування форми при осадці. Аналіз результату експерименту підтверджує, що після осадки заготовка має мінімальну увігнутість (рис. 9).



МСЕ Експеримент

Рис. 9. Порівняння напівзаготовок, отриманих МСЕ (зліва) та експериментально (праворуч)

Отримані експериментальні результати підтверджують зміну НДС під час осадки заготовки з уступами. Проведено ультразвукове випробування після кування. УЗК показав, що під час осадки розміри дефектів зменшилися. Додатково встановлено, що відсутність опуклості на бічній поверхні («діжка») під час осадки виключає утворення тріщини.

ВИСНОВКИ

1. Збільшення ступеня осадки від 0,1 до 0,45 призводить до зміни параметра напруженого стану η від –1,0 до 0. Подальша осадка до 0,7 збільшує цей параметр до +1,5. Визначено, що зменшення діаметра уступів призводить до зменшення параметра η.

2. Збільшення діаметра уступу (*d/D*) призводить до зменшення ступеня закриття дефекту. Високі виступи збільшують ступінь дефектів закриття.

3. Встановлено, що зменшення діаметра та збільшення висоти уступів призводить до зменшення опуклості в досліджуваному діапазоні розмірів заготовки. Опуклість збільшується при зменшенні діаметра уступів. «Діжка» розплющується і при подальшій осадці бічна поверхня заготовки набуває форми, наближеної до циліндричної. Відносний діаметр і висота виступів повинні бути *d/D* = 0,5…0,7 і *h/D* = 0,4…0,6 відповідно задля закриття дефектів під час осадки.

4. Отримані результати кування в промислових умовах підтвердили визначені рекомендації геометрії заготовки методом МСЕ. Розроблені рекомендації з геометричних параметрів заготовки з конічними виступами були реалізовані при виготовленні великих поковок.

REFERENCES

1. Wang J., Fu P., Liu H., Li D., Li Y. Shrinkage porosity criteria and optimized design of a 100-ton $30Cr_2Ni_4MoV$ forging ingot. *Mater. Design.* 2012. 35, pp. 446-456. http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2011.09.056

2. Zhang X-X., Cui Z-S., Chen W., Li Y. A criterion for void closure in large ingots during hot forging. *J Mater Process Tech.* 2009. 209(4), pp. 1950-1959.. http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.04.051

3. Markov O.E., Perig A.V., Markova M.A., Zlygoriev V.N. Development of a new process for forging plates using intensive plastic deformation. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016. 83 (9-12), pp. 2159-2174. DOI: 10.1007/s00170-015-8217-5 http://doi.org/10.1007/s00170-015-8217-5

4. Chao Feng, Zhenshan Cui, Mingxiang Liu, Xiaoqing Shang, Dashan Sui, Juan Liu. Investigation on the void closure efficiency in cogging processes of the large ingot by using a 3-D void evolution model. *Journal of Materials Processing Technology*. 2016. 237 (2016), pp. 371–385. http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.06.030

5. Chao Feng, Zhenshan Cui, Mingxiang Liu, Xiaoqing Shang, Dashan Sui, Juan Liu. Investigation on the void closure efficiency in cogging processes of the large ingot by using a 3-D void evolution model. *Journal of Materials Processing Technology*. 2016. 237, pp. 371–385. http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.06.030

6. Markov O. E., Gerasimenko O. V., Kukhar V. V., Abdulov O. R., Ragulina N. V. Computational and experimental modeling of new forging ingots with a directional solidification. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2019. 41(8). doi:10.1007/s40430-019-1810-z

7. Markov O.E. Forging of large pieces by tapered faces. Steel in Translation. 2012. 42(12), pp. 808-810. doi:10.3103/S0967091212120054

8. Markov O., Zlygoriev V., Gerasimenko O., Hrudkina N., Shevtsov S. Improving the quality of forgings based on upsetting the workpieces with concave facet. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. 5 (1-95), pp. 16-24. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.142674 http://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.142674

9. Lee Y.S., Lee S.U., Van Tyne C.J., Joo B.D., Moon Y.H. Internal void closure during the forging of large cast ingots using a simulation approach. *J Mater Process Tech.* 2011. 211(6), pp. 1136-1145. http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2011.01.017.

Марков О. Е., Хващинский А. С., Мусорин А. В., Лысенко А. А., Молодецкий В. В. Исследование нового способа ковки крупных слитков на основе осадки заготовок с уступами

В работе предложен и исследован новый способ осадки заготовок с коническими выступами. Относительная высота заготовки перед осадкой составляла H/D = 3,0. Напряженно-деформированное состояние (НДС) исследовано для определения уровня и знака сжимающих напряжений в заготовке. Кроме того, оценен параметр напряженного состояния в местоположении осевых дефектов. Определены степень смыкания осевого дефекта и размер выпуклости. Эти параметры были определены для разных размеров диаметров и высоты. Установлено, что осадка заготовки коническими выступами приводит к равномерному распределению деформации в теле заготовки. Во время осадки на боковой поверхности и осевой зоне возникают сжимающие напряжения вследствие появления вогнутой формы заготовки. Кроме того, наблюдается уменьшение размеров осевых дефектов и выпуклость боковой поверхности. Определены эффективные геометрические параметры заготовки. Установлено, что уменьшение диаметра и увеличение высоты уступов приводит к уменьшению выпуклости в изучаемом диапазоне размеров заготовки. Выпуклость увеличивается при уменьшении диаметра уступов. «Бочка» выравнивается и при последующей осадке боковая поверхность заготовки принимает форму, приближенную к цилиндрической. Относительный диаметр и высота выступов должны быть d/D = 0,5…0,7 и h/D = 0,4…0,6 соответственно для закрытия дефектов при осадке. Рекомендованная степень осадки 50 %. Определенные рекомендации проверены экспериментально при ковке слитка массой 66 500 кг. Полученные экспериментальные данные подтвердили результаты моделирования методом конечных элементов (МКЭ). Результаты исследования внедрены в промышленность.

Ключевые слова: *ковка, слиток, осадка, осевые дефекты, конические выступы, закрытие дефектов, сжимающие напряжения, выпуклость.*

Марков О. Є., Хващинський А. С., Мусорін А. В., Лисенко А. А., Молодецький В. В. Дослідження нового способу кування великих злитків на основі осадження заготовок з уступами

У роботі запропоновано та досліджено новий спосіб осадження заготовок з конічними виступами. Відносна висота заготовки перед осадкою становила H / D = 3,0. Напружено-деформований стан (НДС) досліджено для визначення рівня та знаку стискаючих напруг у заготовці. Крім того, оцінено параметр напруженого стану в місці розташування осьових дефектів. Визначено ступінь змикання осьового дефекту та величину опуклості. Ці параметри були визначені для різних розмірів діаметрів і висоти. Встановлено, що осадка заготовки з конічними виступами призводить до рівномірного розподілу деформації в тілі заготовки. Під час осадки на бічній поверхні і в осьовій зоні виникають стискаючі напруги внаслідок появи увігнутої форми заготовки. Крім того, спостерігається зменшення розмірів осьових дефектів і опуклість бічної поверхні. Визначено ефективні геометричні параметри заготовки. Встановлено, що зменшення діаметра та збільшення висоти уступів призводить до зменшення опуклості в досліджуваному діапазоні розмірів заготовки. Опуклість збільшується при зменшенні діаметра уступів. «Діжка» розплющується і при подальшій осадці бічна поверхня заготовки набуває форми, наближеної до циліндричної. Відносний діаметр і висота виступів повинні бути d/D = 0,5…0,7 і h/D = 0,4…0,6 відповідно задля закриття дефектів під час осадки. Рекомендований ступінь осадки 50 %. Визначені рекомендації перевірені експериментально під час кування зливка масою 66 500 кг. Отримані експериментальні дані підтвердили результати моделювання методом скінченних елементів (МСЕ). Результати дослідження впроваджено в промисловість.

Ключові слова: *кування, злиток, осадка, осьові дефекти, конічні виступи, закриття дефектів, стискаючі напруги, опуклість*

Markov O. E., Khvashchynskyi A. S., Musorin A. V., Lycenko A. A., Molodetskie V. V. Study of new forging process of ingots based on deformation of workpieces with conical ledges

New process of workpieces upsetting with ledges has been developed and studied in the work. Workpiece's ratio length before deformation was H / D = 3.0. Strain and stress condition has been studied to find the sign and level of compress stresses in a forged piece. Moreover, the parameter of the stress state in the zone location of the cavities has been evaluated. The closing degree of axial cavities has been determined. This parameter has been found for different heights and diameters. It has been found that the workpiece upsetting with ledges leads to a uniform stress into the forged-piece body. During deformation on the perifical surface and in the central zone there is compress stress due to the formation forged-piece with the concave size. Moreover, there is a closing of the internal cavities and recess on the lateral surface. Effective geometrical parameters of the initial workpiece have been found. It has been established that a decrease in the diameter and an increase in the height of the ledges leads to a decrease in the convexity in the studied range of workpiece sizes. The convexity increases as the diameter of the ledges decreases. The "barrel" is leveled and during subsequent upsetting, the side surface of the workpiece takes on a shape close to cylindrical. The relative diameter and height of the protrusions should be d/D = 0.5…0.7 and h/D = 0.4…0.6, respectively, to close defects during

upsetting. The effective degree of deformation is 50 %. Determined relations have been checked out by experimentally in the process of the ingot`s forging weight equal to 66.5ton. Obtained practical results confirms the FEM results. The results of the investigation have been introduction in the manufacturing.

Keywords: *forging, upset, internal defects, ingot, ledges, defects welding, compressive strains.*

Марков Олег Євгенійович – д-р техн. наук, проф., зав. кафедрою АВП ДДМА
Марков Олег Евгеньевич – д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой АПП ДГМА
Markov Oleg – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Head of Department DSEA
E-mail: oleg.markov.omd@gmail.com
ORCID: 0000-0002-2467-9607

Хващинський Антон Станиславович – аспірант ДДМА
Хващинский Антон Станиславович – аспирант ДГМА
Khvashchynskyi Anton – Graduate student DSEA
E-mail: antonio.hvashherman@ukr.net
ORCID: 0000-0002-2690-8354

Мусорін Антон Володимирович – аспірант ДДМА
Мусорин Антон Владимирович – аспирант ДГМА
Musorin Anton – Graduate student DSEA
E-mail: anton.m.95@mail.ru
ORCID: 0000-0002-4145-9665

Лисенко Антон Андрійович – аспірант ДДМА
Лысенко Антон Андреевич – аспірант ДГМА
Lysenko Anton – Graduate student DSEA
E-mail: antl31@ukr.net
ORCID: 0000-0001-5454-6357

Молодецький Віталій Васильович – начальник відділу ПрАТ «НКМЗ»
Молодецкий Виталий Васильевич – начальник отдела ЧАО «НКМЗ»
Molodetskyi Vitalii – Head of Department NKMZ
E-mail: Molvet2876@gmail.com
ORCID: 0000-0001-5766-1684

ПрАТ «НКМЗ» – Приватне акціонерне товариство «Новокраматорський машинобудівний завод», м. Краматорськ
ЧАО «НКМЗ» – Частное акционерное общество «Новокраматорский машиностроительный завод», г. Краматорск
NKMZ – Novokramatorsky Mashinostroitelniy Zavod, Kramatorsk

ДДМА – Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ
ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск
DSEA – Donbas State Engineering Academy, Kramatorsk

Стаття надійшла до редакції 10.06.22 р.

УДК 621.73.16 DOI: 10.37142/2076-2151/2022-1(51)71

Гожій С. П.
Мироненко В. А.

ПЕРСПЕКТИВНИЙ НАПРЯМ ЛОКАЛЬНОГО ФОРМОУТВОРЕННЯ – СУМІЩЕНЕ ШТАМПУВАННЯ ОБКОЧУВАННЯМ

Багаторічні дослідження процесу штампування обкочуванням, відпрацювання технологічних процесів обробки та розробка обладнання і оснащення, які проводяться на кафедрі технології виробництва літальних апаратів науково-навчального механіко-машинобудівного інституту Національного технічного університету "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", призвели до реєстрації і накопичення випадків, коли зразки зазнавали руйнування. Саме характерне руйнування при штампуванні обкочуванням стало підставою до розповсюдження традиційного процесу за рахунок якісних ефектів. Специфічне силове та циклове навантаження при локальному деформуванні викликають нетипове, на перший погляд, в порівнянні з звичайним стисканням, руйнування. В статті наведені експериментальні результати досліджень та характроні руйнування зразків. Найбільш поширеним видом руйнування при штампуванні обкочування є утворення центральної лунки. Розглянута фізична модель при пластичному формоутворенні та надані детальні пояснення таким проявам процесу як руйнування центральної частини. Запропоновані заходи запобігання та позитивного застосування. Одним з варіантів застосування є утворення нових процесів і обладнання. що суміщають два принцеси і дозволяють отримати нову якість та розширити технологічні можливості. Новий технологічний процес і схема обробки суміщеного штампування обкочування та прошивання змодельовані із застосуванням методу скінчених елементів для групи типових деталей. Результати моделювання підтвердили базові передумови. Технологічний процес готується до виробничого впровадження.

Ключові слова: *штампування обкочуванням, руйнування зразків, метод скінчених елементів, питомі зусилля, осередок деформації, суміщене штампування обкочуванням*

Аналіз руйнування зразків при локалізованому стисканні обкочуванням, яке притаманне більшості технологічних операцій або етапів процесу, та виявлення фізичних причин, що їх викликали, показав, що вони відбуваються за класичними закономірностями, але мають специфічний прояв, який пов'язаний з специфікою протікання процесу.

В технічній літературі майже повністю відсутні відомості про типові види руйнування зразків при локалізованому стисканні та аналіз причин руйнування. Найбільше даних про поза контактні зміни форми в центральній зони деталі у вигляді лунки та виробничі дефекти штампування обкочуванням (ШО) [1, 2, 3].

Метою роботи є запобігання характерним видам руйнування та появі виробничого браку чи запровадження заходів, що не тільки усувають негативні прояви, але і розширюють технологічні можливості процесу.

Характерним дефектом циліндричних деталей отриманих ШО є центральна поверхнева лунка, яка розвивається і призводить до руйнування. Цей дефект виникає при обкочуванні відносно тонких циліндричних зразків ($d/h > 4…6$, де d – діаметр зразка; h – висота) і він проявляється навіть при незначних ступінях деформації.

Механізм утворення лунки протікає у відповідності до розглянутої моделі напруженого стану. Характерною особливістю ШО є локалізований осередок деформації від дії обкочувального інструменту. Форма осередку контактних деформації визначена експериментально [4] і аналітично [5]. В залежності від співвідношення розмірів осередку на контакті переважають тангенціальні або радіальні деформації. При найбільш ефективних параметрах штампування, коли співвідношення площі осередку (F_K) до площі торця заготовки (F) знаходяться в межах $\lambda = F_K/F \approx 0,1$, переважають тангенціальні деформації [6, 7], які одночасно викликають силове навантаження в поза контактній частині деталі.

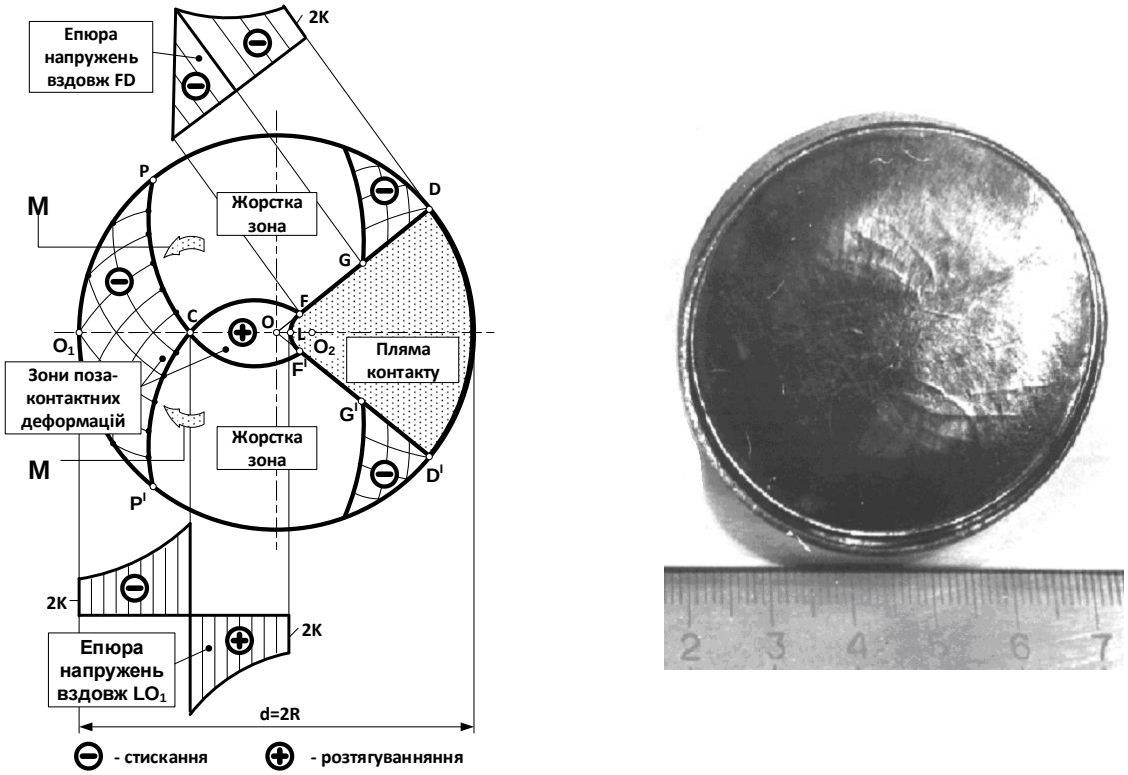
В основу будови моделі [8] покладені якісні ефекти, які були встановлені експериментально при осаджуванні обкочуванням циліндричних зразків. Основним якісним моментом є реєстрація в центральній області напружень розтягу.

Наявність центральної зони, що розтягнута, свідчить про переважно тангенціальну течію металу з контактного пластичного осередку. За механізм деформування, який пояснює

ефект утворення центральної лунки, слід вважати пластичний вигин заготовки в поза контактній області, що протилежить контактному осередку деформування. Фізична модель напружено-деформованого стану представлена на (рис. 1, *а*) [8]. Будова моделі підтверджується не тільки опосередкованими ефектами, а і стовщенням полотнини заготовки [7], що протилежить осередку деформування, а також спостереженням поля ліній ковзання (Чернова-Людерса) в цій частині на торцевій поверхні заготовки (рис. 1, *б*).

Пластичний вигин в позаконтактній зоні виникає і розвивається під дією моментів **M**, які викликані тангенціальною течією металу з контактного осередку деформації, як на (рис. 1, *б*).

Маючи обчислені геометричні розміри осередку контактних деформацій можливо збудувати фізичну і геометричну модель дії зон контактних та позаконтактних пластичних течій. Можна також визначити напруження та характер їх розподілу на контурі локалізованого осередку та в позаконтактній області (рис.1,*б*). Розміри центральної зони, де виникає пластична лунка, яка утворюється від дій напружень розтягу, вирахувані аналітично [8].



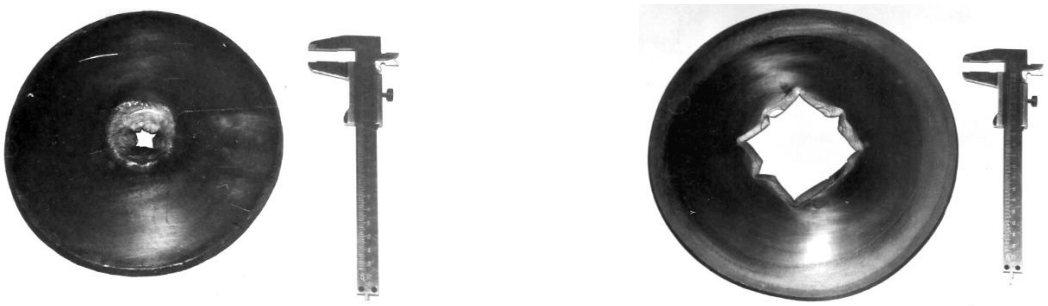
а *б*

Рис. 1. Будова фізичної моделі напруженого стану і пластичних течій при осаджуванні циліндричної заготовки обкочуванням (**M** – моменти, що викликані тангенціальною течією металу з плями контакту та створюють стовщення в зоні поза контактної деформацій):

а – схема моделі пластичних течій з локалізованої плями контакту з утворенням позаконтактних зон деформацій; *б* – спостереження ліній ковзання на торцевій поверхні циліндричної заготовки, які покладені в основу будови моделі

При обробці пластичних матеріалів і при досягненні значних ступенів деформації поверхнева лунка переростає у центральний крізний отвір. На рис. 2 надані фотографії циліндричних свинцевих зразків після осаджування обкочуванням на 87 % та 95 % висотної деформації відповідно.

Руйнування супроводжується значними пластичними деформаціями, зокрема початково виникає пластична лунка. Згодом виникають поверхні розривів, що вимальовують чотирипроменеву зірку, яка при наступній деформації трансформується в правильний квадрат. На рис. 2, *б* видно зародження нових вершин квадрату (поверхонь розривів), так як квадратний отвір досяг своїх максимальних розмірів по відношенню до розмірів зразка і не в змозі розвиватися надалі.



а *б*

Рис. 2. Свинцевий циліндричний зразок після осаджування обкочуванням:
а – на 87 % висотної деформації; *б* – на 95 % висотної деформації

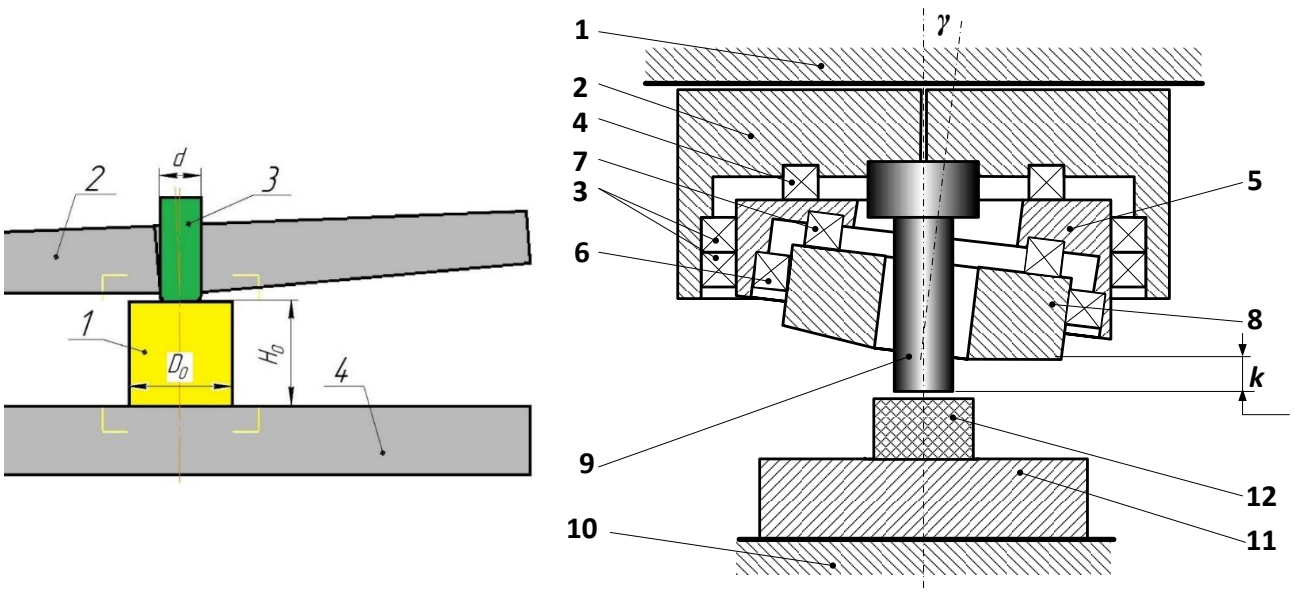
Після утворення центральної лунки контакт між інструментом і заготовкою відсутній, центральна частина заготови знаходиться в зоні плоского напруженого стану розтягу.

Особливість утворення в центральній частині напружень розтягу при ШО має сенс позитивного застосування з одночасним зануренням прошивного пуансону (утворенні центральної порожнини). В такому випадку технологічний ефект від ШО стрімко підвищується:

- одночасно на одній позиції виконуються декілька різних операцій без переміщення та переорієнтації, що вплине на загальну продуктивність;
- перед початком ШО центральний пуансон притисне заготовку, що унеможливлює її зміщення або вивертання на початковій стадії, а надалі центральний пуансон утримує заготовку, що підвищує точність виготовлення [9];
- можна спрогнозувати, що в умовах дії осередку напружень розтягу питомі зусилля на прошивному пуансоні будуть меншими ніж при традиційному прошиванні.

Це дає виграш в продуктивності та має технологічні переваги з позиції якості та енерговитратності. Суміщення ШО з одночасним прошиванням, коли периферія заготовки оброблюється обкочувальною головкою, а центральна частина прошивається центральним пуансоном (рис.3,*а*) надає комплексний позитивний ефект. Має місце унікальна технічна ситуація: з однієї сторони обкочувальна головка, що виконує ШО, створює умови для процесу прошивання; з іншої, прошивання забезпечує якість виробів без суттєвого стоншення центральної частини.

Зважаючи на складність процесу, коли прошивний пуансон знаходиться всередині обкочувальної головки існують конструкторські рішення його реалізації. Найбільш простим по конструкції є пристрій облаштований жорстким прошивним пуансоном, схема якого надана на рис. 3, *б*. На повзуні 1 пресу (прес не показаний) облаштований пристрій орбітального руху обкочування, який складається з корпусу 2, в якому на радіальних 3 і упорних 4 підшипниках з можливістю обертання змонтований ротор 5 з нахиленою під кутом γ проточкою. В нахилену проточку ротору 5 вмонтована на радіальному 6 і упорному 7 підшипниках обкочувальна головка 8. Вздовж центральної осі в корпусі 2 жорстко встановлений прошивний пуансон 9, який виступає за горизонтальну твірну конусу обкочувальної головки на величину k, що відповідає глибині порожнини, яка буде прошиватись. На столі пресу 10 кріпиться опорний інструмент 11, на якому розташовується циліндрична заготовка 12.



а *б*

Рис. 3. Схема процесу та пристрою для суміщеного штампування обкочуванням та прошивання процесу (*1* – заготовка; *2* – обкочувальна головка; *3* – центральний прошивний пуансон, що виступає на задану глибину порожнини *k=2мм*; *4* – нижня плита; H_O та D_O – висота та діаметр циліндричної заготовки; *d* – діаметр прошивного пуансону: 1 - повзун пресу; 2 – корпус; 3,6 – радіальні підшипники; 4,7 – упорні підшипники; 5 - ротор; 8 - обкочувальна головка; 9 - прошивний пуансон; 10 - стіл пресу; 11 - опорний інструмент; 12 - циліндрична заготовка; *k* – величина виступу прошивного пуансону; *γ* – кут нахилу осі обкочувальної головки): *а* – розрахункова схема суміщеного процесу; *б* – конструктивна схема пристрою

Цей варіант конструкції (рис. 3,*б*) реалізується в пристроях обкочувальних рухів безводильного типу [10] за рахунок нескладної модернізації, інші вимагають більш складного конструкторського доопрацювання.

Було приведене чисельне моделювання процесу суміщеного ШО та прошивання. Схема процесу суміщеного штампування наведена на рис. 3,*а*. Процес відбувається наступним чином: заготовка 1 встановлюється на нижню плиту 4. Центральний пуансон 3 та обкочувальна головка 2 рухаються вниз вздовж осі заготовки із рівними швидкостями, спочатку прошиваючи отвір і згодом деформуючи заготовку по висоті.

При цьому, центральний пуансон на початку і впродовж всього процесу виступає за край обкочувальної головки на незмінну величину *k* для створення осьового притискання заготовки до нижньої плити в момент початку деформування заготовки обкочувальною головкою для усунення вивертання заготовки під дією цього інструменту.

ШО не можливо звести до плоскої або вісесиметричної задачі, то моделювання МСЕ проводилось в тривимірній постановці.

ШО характеризується наявністю обкочувальної головки (активного інструменту), що призводить до зростання часу обчислень. Для зменшення часу для розрахунків, матеріал заготовки приймався жорстко-пластичним, матеріал інструментів – жорстким.

Моделювання проводилось в ізотермічній постановці – температура заготовки та інструментів під час моделювання – незмінні (20^0C), без термоефекту та теплопередачі.

В якості матеріалу заготовки було прийнято американський аналог Сталі 35Х – AISI 5135H. Заготовку було дискретизовано на 40000 скінченних елементів тетраедричної форми (рис. 4).

Коефіцієнт тертя між заготовкою та інструментом було прийнято рівним 0,12. -Швидкість осьового переміщення обкочувальної головки та центрального пуансону були прийнятими однаковими та рівними 2,5 мм/с. Частота прецесії обкочувальної головки становила 280^{-1}. Такі параметри забезпечують коефіцієнт співвідношення площ $\lambda = 0,1$.

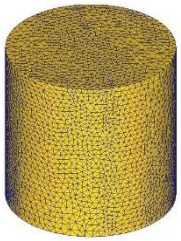


Рис. 4. Скінченно-елементна сітка на вихідній заготовці

Так як ціллю моделювання є встановлення енерго-силових параметрів та закономірностей і напружено-деформованого стану при різних співвідношеннях висоти вихідної заготовки до її діаметру (H_0/D_0) та при різних співвідношеннях діаметру прошивного пуансону до діаметру вихідної заготовки (d/D_0), то для дослідження впливу зміни вищезгаданих параметрів на процес суміщеного штампування обкочуванням були прийняті наступні співвідношення розмірів заготовок і центральних пуансонів (табл. 1), утворюючи таким чином дев'ять варіантів комбінацій для досліджень.

Таблиця 1

Вихідні розміри заготовок та пуансонів

Параметр / № варіанту	H_0, мм	D_0, мм	H_0/D_0	d, мм	d/D_0
1.1	30,0	30,0	1,0	12,0	0,4
1.2				9,0	0,3
1.3				6,0	0,2
2.1	24,76	33,02	0,75	13,21	0,4
2.2				9,91	0,3
2.3				6,6	0,2
3.1	18,9	37,8	0,5	15,12	0,4
3.2				11,34	0,3
3.3				7,56	0,2

На рис. 5 показано кінцеву форму виробу по варіанту 2.1, кінцева форма у випадку варіантів 1.1-3.1 – подібна.

На рис. 6 наведений графік залежності зусилля на деформуючих інструментах від їх переміщення та графіки сумарного навантаження.

а *б*

Рис. 5. Кінцева формозміна заготовки по розмірам інструменту по варіанту 2.1:
а – загальний вигляд; *б* – збільшена центральна лунка під прошивним пуансоном при глибині занурення прошивного пуансону $k = 2$ мм

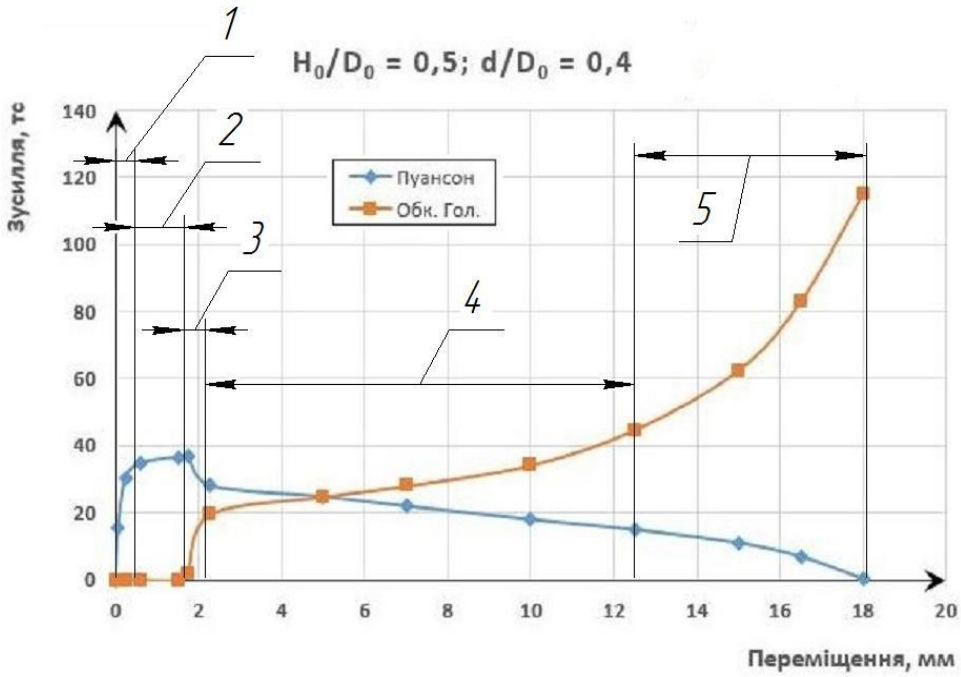


Рис. 6. Графік співвідношення «Зусилля – Переміщення» за результатами моделювання та характерні зони (H_O та D_O – висота та діаметр циліндричної заготовки; d – діаметр прошивного пуансону: 1, 2, 3, 4, 5 – характерні зони на графіку)

Результати моделювання показують, що характер напружено-деформованого стану при різних співвідношеннях розмірів заготовок та пуансонів є подібним, також подібним є характер кривих. Опис особливостей , проводитися по одному графіку-представнику, який показаний на рис. 6, де позначені: - 1 – зона занурення деформуючої частини прошивного центрального пуансона, характеризується стрімким зростанням зусилля деформування; - 2 – зона сталого деформування заготовки центральним пуансоном, характер зміни зусилля – сталий; - 3 – перехідна зона, обкочувальна головка починає деформувати заготовку, як видно з рис.6, контакт обкочувальної головки із заготовкою виникає при переміщенні інструмента на відстані меншій ніж відстань виступу центрального пуансону з обкочувальної головки (k = *2 мм*), що пов'язано із утворенням, характерного для процесу прошивання напливу на поверхні заготовки, неусталений характер зусилля на обкочувальній головці продовжується до розгладжування напливу, в той час як, зусилля на пуансоні починає стрімко спадати, що підтверджує виникнення зони розтягу в центрі заготовки; - 4 – характеризується рівномірною зміною зусилля на інструментах до 5 %, з однаковою швидкістю спадання на пуансоні та зростання на обкочувальній головці; - 5 – зона інтенсивного зростання зусилля на обкочувальній головці, через значне зменшення висоти заготовки, та інтенсивного спадання зусилля на пуансоні, у зв'язку із зростанням рівня розтягуючих напружень в центрі заготовки.

Середні напруження на інструментах було розраховано, як відношення поточного зусилля на інструменті до поточної площі контакту. У випадку центрального прошивного пуансона, площа контакту залишається незмінною. У випадку обкочувальної головки, площа контакту весь час змінюється, тому для кожного моменту часу її було обраховано за допомогою вбудованого в програмне середовище інструменту для визначення контактної площі.

Характер розподілу середніх напружень при різних співвідношеннях розмірів заготовок та пуансонів є подібним, також подібним є характер закономірностей самих кривих. Опис особливостей буде проводитися по одному графіку-представнику, який показаний на рис.7, де позначені: - 1 – це зона занурення деформуючої частини центрального пуансона (характеризується стрімким зростанням середніх напружень) та сталого деформування заготовки центральним пуансоном; - 2 – це перехідна зона, коли обкочувальна головка починає деформувати заготовку, а саме, напливи на поверхні заготовки біля пуансону, це пояснює пік на графіку;

- 3 – зона розгладжування напливу, зусилля на пуансоні починає різко спадати, що підтверджує припущення про утворення зони розтягу в центрі заготовки; - 4 – характеризується рівномірністю середніх напружень на інструментах, приблизно з однаковою швидкістю спадання на пуансоні та зростання на обкочувальній головці; - 5 – зона незначного зростання середніх напружень на обкочувальній головці, через значне зменшення висоти заготовки, та інтенсивного спадання середніх напружень на пуансоні, у зв'язку із зростанням дії розтягуючих напружень в центрі заготовки.

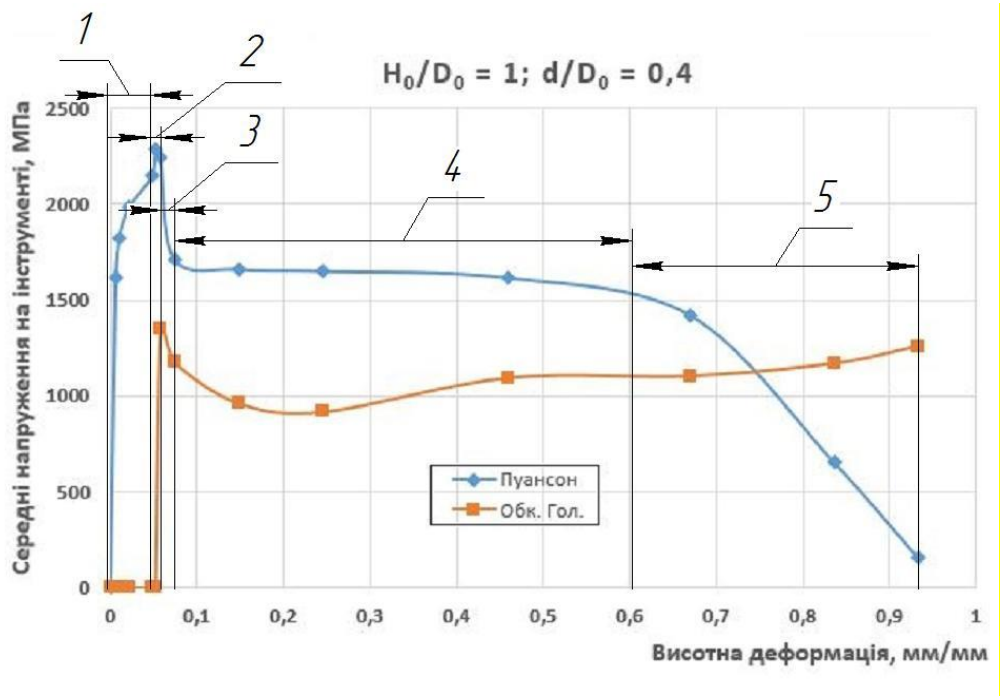


Рис. 7. Графік співвідношення «Середні напруження на інструменті – Висотна деформація» за результатами чисельного моделювання та характерні зони (H_O та D_O – висота та діаметр циліндричної заготовки; d – діаметр прошивного пуансону: 1, 2, 3, 4, 5 – характерні зони на графіку)

Ефект від дії напружень розтягу в центрі заготовки настільки значний, що в центрі заготовки з протилежної сторони від центрального прошивного пуансону утворюється лунка, форма та розмір якої показаний на рис.5,*б*.

Вплив співвідношення діаметру пуансону до початкового діаметру заготовки (d/D_0) і вплив співвідношення початкової висоти заготовки до початкового діаметру заготовки (H_0/D_0) є невизначальними.

На поточний момент проводяться дослідницькі роботи в двох напрямах. По-перше, створюється спеціалізоване оснащення і обладнання для реалізації суміщених з ШО процесів. По-друге, розробляються нові перспективні схеми утворення суміщених схем обробки та визначаються їх технологічні можливості.

Стаття підготовлена з використанням матеріалів магістерської дисертації Субботенка Г. М. – «Комп'ютерне та експериментальне моделювання формоутворення фланця штампуванням обкочуванням з активними силами тертя», захищеної на кафедрі механіки пластичності матеріалів та ресурсозберігаючих процесів у 2014 році за спеціальності 131 прикладна механіка.

ВИСНОВКИ

Особливу технологічну зацікавленість при ШО викликає центральна зона, де виникають і діють напруження розтягу, що призводить до її позаконтактних деформацій, а згодом

і до руйнування. Тому при проектуванні технологічних процесів виготовлення відносно тонких та фланцевих деталей слід вживати технологічних заходів щодо забезпечення щільності цієї зони: - деформування обкочувальною головкою у вигляді усіченого конусу, який в початковий період сформує стовщення центральної частини; - спрямоване формування стовщення центральної частини; - при формоутворенні фланця призначити конечні розміри з міркувань, щоб діаметр стрижневої частини був більший за центральну зону дії напружень.

В ряді випадків, виникнення і дію напруження розтягу можна використати з технологічною корисністю, зокрема, при формуванні з енергетичною доцільністю центральної порожнини.

Шляхом моделювання методом скінченних елементів встановлено напружено-деформований стан заготовки, енерго-силові параметри процесу та підтверджено виникнення зони напружень розтягу і доцільність використання центрального прошивного пуансона.

Поєднання процесу ШО, який виконується на периферійній частині заготовки, з іншими операціями обробки надає нові технологічні можливості виготовлення конструкцій машинобудування з утворенням позитивних якісних і кількісних властивостей.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Гожій С. П. Особливості руйнування деталей при виконанні операцій штампування обкочуванням. *Наукові вісті НТУУ «КПІ».* 2007. 1(51). С. 58-65.

2. Кривда Л. Т., Гожій С.П. Технологічні особливості стабілізації технологічних процесів моноблочного штампування обкочуванням деталей з відносно тонким фланцем. *Вісник НТУУ «КПІ». Серія Машинобудування*. 1999. 37. С. 53-57.

3. Божидарник В. В., Сулим Г. Т. Елементи теорії пластичності та міцності. У 2 т. Львів: Світ, 1999. Т. І. 532 с.

4. Marciniak Z., Chjdakowski A. Press for rotary forging. *Shahl und Eisen*. 1970. 90. 20, pp. 1077-1080.

5. Кривда Л. Т., Гожій С. П. Геометрія контакту при пластичному деформуванні обкочуванням. *Наукові вісті НТУУ «КПІ»*. 2006. 3(47). С. 49-56.

6. Yu Z., Chen M., Ma C., Luo S., Zhu C. Numerical model simulation of the double-roll rotary forging of large diameter thin-walled disk. *Metals.* 2021. 11, p. 1767. https://doi.org/10.3390/met11111767.

7. Тітов В., Гожій С., Мироненко В. Універсальна дослідна установка для пресування трубних заготовок. *Механіка та новітні технології.* 2022. 6 (1). https://doi.org/10.20535/2521-1943.2022.6.1.260002.

8. Гожій С. П. Розвиток моделі пластичних деформацій при осаджуванні циліндричного зразка обкочуванням. *Вісник НТУУ «КПІ». Серія Машинобудування*. 2008. 52. С. 359-365.

9. Кривда Л. Т., Гожій С. П. Спосіб виготовления деталей: патент 15245. Україна. B21D 37/00. № u20512822; заявл. 29.12.2005; опубл. 15.06.2006.

10. Гожій С. П., Ландар Р. М., Носенко А. І. Класифікація обладнання для штампування обкочуванням. *Обработка материалов давлением*. Краматорск: ДГМА. 2011. (26). С. 209-211.

REFERENCES

1. Gozhii S.P. Peculiarities of the destruction of parts during rolling stamping operations. *Scientific news NTUU "KPI"*. 2007. 1(51), pp. 58-65. *(in Ukrainian).*

2. Kryvda L.T. Gozhii S.P. Technological features of stabilization of technological processes of monobloc stamping by rolling of parts with a relatively thin flange. *Herald NTUU "KPI". Mechanical engineering series*. 1999. 37, pp. 53-57. *(in Ukrainian).*

3. Bozhidarnyk V.V., Sulym G.T. Elements of the theory of plasticity and strength. In 2 t. Lviv: Svit. 1999. T. I. 532 p. *(in Ukrainian)*

4. Marciniak Z., Chjdakowski A. Press for rotary forging. *Shahl und Eisen*. 1970. 90. 20, pp. 1077-1080.

5. Kryvda L.T. Gozhii S.P. Contact geometry during plastic deformation by rolling. *Scientific news NTUU "KPI"*. 2006. 3(47), pp. 49-56. *(in Ukrainian)*

6. Yu Z., Chen M., Ma C., Luo S., Zhu C. Numerical model simulation of the double-roll rotary forging of large diameter thin-walled disk. *Metals*. 2021. 11, p. 1767. https://doi.org/10.3390/met11111767

7. Titov V., Gozhii S., Myronenko V. Universal experimental installation for pressing pipe blanks. *Mechanics and New Technologies*. 2022. 6 (1). https://doi.org/10.20535/2521-1943.2022.6.1.260002. *(in Ukrainian).*

8. Gozhii S.P. Development of the model of plastic deformations during deposition of a cylindrical sample by rolling. *Herald NTUU "KPI". Mechanical engineering series*. 2008. 52, pp. 359-365. *(in Ukrainian).*

9. Kryvda L.T., Gozhii S.P. The method of manufacturing parts: Pat. 15245. Ukraine. B21D 37/00. Bull. 6, 15.06.2006.

10. Gozhii S.P., Landar R.M., Nosenko A.I. Classification of rolling stamping equipment. *Processing of Materials Working by Pressure*. Kramatorsk: DSEA. 2011. 1 (26), pp. 209-211. *(in Ukrainian).*

Gozhii S. P., Myronenko V. A. Prospective direction of local formation - combined stamping by rolling

Long-term research of the process of rolling stamping, development of technological processes of processing and development of equipment and equipment, which are carried out at the Department of Aircraft Production Technology of the Scientific and Educational Mechanics and Mechanical Engineering Institute of the National Technical University of Ukraine "Ihor Sikorskyi Kyiv Polytechnic Institute", led to the registration and accumulation of cases, when the samples were subjected to destruction. It is the characteristic destruction during rolling stamping that became the basis for the spread of the traditional process at the expense of quality effects. Specific force and cyclic loading during local deformation cause atypical, at first glance, destruction compared to ordinary compression. The article presents the experimental results of the research and the characteristics of the destruction of the samples. The most common type of failure during rolling stamping is the formation of a central hole. The physical model during plastic molding is considered and detailed explanations are provided for such manifestations of the process as the destruction of the central part. A new technological process and processing scheme of combined rolling and stitching stamping is modeled using the finite element method for a group of typical parts. The simulation results confirmed the basic assumptions. The technological process is being prepared for production implementation.

Keywords: *rolling stamping, destruction of samples, finite element method, average specific forces, deformation center, combined rolling stamping.*

Гожий С. П., Мироненко В. А. Перспективное направление локального формообразования – совмещенная штамповка обматыванием

Многолетние исследования процесса штамповки обкатыванием, отработка технологических процессов обработки и разработка оборудования и оснащения, проводимых на кафедре технологии производства летательных аппаратов научно-учебного механико-машиностроительного института Национального технического университета "Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского", привели к регистрации и накоплению случаев, когда образцы терпели разрушение. Самое характерное разрушение при штамповке обкатыванием легло в основу распространения традиционного процесса за счет качественных эффектов. Специфическую силовую и цикловую нагрузку при локальном деформировании вызывают нетипичное, на первый взгляд, по сравнению с обычным сжатием, разрушение. В статье приведены экспериментальные результаты исследований и характер разрушения образцов. Наиболее распространенным видом разрушения при штамповке обкатки является образование центральной лунки. Рассмотрена физическая модель при пластическом формообразовании и даны подробные объяснения таким проявлениям процесса как разрушение центральной части. Предложены меры по предотвращению и положительному применению. Одним из вариантов применения является образование новых процессов и оборудования. совмещающие два принцесса и позволяющие получить новое качество и расширить технологические возможности. Новый технологический процесс и схема обработки совмещенной штамповки обкатывания и прошивки смоделированы с применением метода конечных элементов для группы типовых деталей. Результаты моделирования подтвердили основные предпосылки. Технологический процесс готовится к производственному внедрению.

Ключевые слова: *штамповка обкаткой, разрушение образцов, метод конечных элементов, средние удельные силы, ячейка деформации, совмещенная штамповка обкаткой.*

Гожій Сергій Петрович – д-р техн. наук, доц., проф. НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»
Gozhii Serhii – Doctor of Technical Sciences, Docent, Associate Professor, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute
Гожий Сергей Петрович – д-р техн. наук, доц., проф. НТУУ «КПИ им. Игоря Сикорского»
E-mail: s.godziy@kpi.ua
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2276-1225

Мироненко Віталій Анатолійович – аспірант НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»
Myronenko Vitalii – Praduate student, NTUU «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»
Мироненко Виталий Анатольевич – аспирант НТУУ «КПИ им. Игоря Сикорского»
E-mail: ll671563@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6624-3564

НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського» – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна
«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» – National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine
НТУУ «КПИ им. Игоря Сикорского» – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», г. Киев, Украина

Стаття надійшла до редакції 15.06.22 р.

УДК 621.73.04 DOI: 10.37142/2076-2151/2022-1(51)80

Медведєв М. І.
Бобух О. С.
Кузьміна О. М.
Самсоненко А.А.

УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ КУВАННЯ ТРУБНИХ ЗАГОТОВОК З ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ В УМОВАХ ТОВ "ДНІПРОПРЕС СТАЛЬ"

Робота присвячена удосконаленню процесу кування титанових сплавів в умовах ТОВ «Дніпропрес Сталь». При виробництві трубних заготовок з нікелевих й титанових сплавів широко застосовується кування круглих злитків діаметром 350 – 950 мм, отримуваних методом вакуумно-дугової або електронно-променевої плавки. При куванні таких зливків виникає значна нерівномірність деформації за перерізом поковки, що впливає на отримувані структуру та механічні властивості напівпродукту, що в свою чергу істотно обмежує технологічні можливості їх переробки. За попередньою технологією кування трубної заготовки з титанового сплаву Grade 2 (вітчизняний аналог ВТ1-0) складалась з протяжки заготовки Ø 630 мм довжиною 1300-1500 мм за три виноси з проміжним підігрівом. За результатами досліджень темплетів на якість металу було виявлено, що макроструктура поковки неоднорідна за перерізом, спостерігаються зони з різною величиною зерна й різною протравленістю. Всередині поковки зерна великі, наявні виділення α-фази, з чіткою границею між зонами, що може негативно відбиватись при пресуванні, оскільки це призводить до утворення розшарувань, тріщин й плів. Для покращення структури й механічних властивостей, що забезпечують отримання бездефектних гарячопресованих труб, запропоновано удосконалити технологічний процес кування в умовах ВАТ «Дніпропрес Сталь» за рахунок зміни параметрів деформації та введення додаткових операцій. Аналіз результатів кування злитків відповідно до запропонованого режиму й металографічних досліджень якості металу трубної заготовки показав, що метал по всьому перерізу має щільну макроструктуру 5-го балу, мікроструктуру 3-го типу, твердість за Брінеллем 185 – 196 НВ, що у подальшому забезпечує бездефектне пресування передільних труб та їх наступну холодну прокатку з отриманням механічних властивостей, що відповідають вимогам нормативної документації ASTM B 338-91a «Standard Specification for Seamless and Welded Titanium and Titanium Alloy Tubes for Condensers and Heat Exchangers».

***Ключові слова**: технологія кування, титаноеі сплави, трубна заготовка, мікро- и макроструктура*

При виробництві трубних заготовок з нікелевих й титанових сплавів широко застосовується кування круглих злитків діаметром 350 – 950 мм, отримуваних методом вакуумно-дугової або електронно-променевої плавки. При куванні таких злитків виникає значна нерівномірність деформації за перерізом поковки, що впливає на отримувані структуру та механічні властивості напівпродукту, що в свою чергу істотно обмежує технологічні можливості їх переробки.

Поведінка матеріалу при куванні, вплив деформаційних параметрів при гарячій деформації та наслідки, що спричиняються вказаними факторами, зокрема для титанових сплавів, вивчаються багатьма дослідниками в усьому світі. Наприклад, у роботі [1] досліджується плин титанового сплаву Ti–10V–4,5Fe–1,5Al при осадці в діапазоні температур 650–900 °С та швидкості деформації 0,001–100 $с^{-1}$, аналізується динаміка мікроструктури досліджуваного сплаву. Аналогічні дослідження проведені для метастабільного сплаву Ti−3,5Al−5Mo−6V−3Cr−2Sn−0,5Fe−0,1B−0,1C у роботі групи китайських науковців [2].Безпосередньо причинам виникнення нерівномірності деформації при осадці титанового сплаву ВТ3-1 присвячена робота казахських вчених [3]. Нерівномірність структури кованих титанових дисків як причина руйнування їх при експлуатації досліджувалась у роботі [4].

Предметом дослідження є технологія кування титанових злитків, зокрема вплив основних факторів деформації на нерівномірність структури та механічні властивості металу поковки.

Метою даної роботи було удосконалення процесу кування титанових сплавів для запобігання значній нерівномірності структури за рахунок зміни технологічних параметрів існуючого виробництва в умовах ТОВ «Дніпропрес Сталь». В статті вирішуються наступні

завдання: дослідження існуючої технології кування титанових злитків в умовах ТОВ «Дніпропрес Сталь»; визначення характеристик макроструктури отримуваних поковок; розробка рекомендацій щодо удосконалення існуючої технології кування на базі основних закономірностей процесу кування та особливостей титанових сплавів; експериментальне кування титанових злитків з використанням розроблених рекомендацій; аналіз отриманих результатів.

З метою визначення впливу режимів деформації на структуру й механічні властивості кованих трубних заготовок в умовах ВАТ «Дніпропрес Сталь» було проведено кування експериментальних злитків з титанового сплава Grade 2 (вітчизняний аналог ВТ1-0, хімічний склад див. таблицю 1) діаметром Ø 630 мм, довжиною 1300 – 1500 мм поставки Запорізького титано-магнієвого комбінату (плавка 0158-2-17), сумарна довжина заготовок склала 8 м. Всі злитки отримані після обточування. Нагрів злитків здійснювали у газових печах. З метою зниження окалиноутворення на поверхню злитків наносили спеціальне захисне покриття марки «Хенкель».

Таблиця 1

Хімічний склад титанового сплаву Grade 2

Хімічний елемент	Вуглець, C	Водень, H	Кисень, O	Азот, N	Залізо, Fe	Всього домішок	Інші елементи	Титан, Ti
Зміст, %	< 0,08	< 0,015	< 0,25	< 0,03	< 0,30	< 0,4	< 0,1	залишок

Існуючий технологічний процес кування в умовах ВАТ «Дніпропрес Сталь» містить такі операції:

1 винос: Нагрів злитку до 1050 ^{0}C. Протяжка злитку з Ø 630 мм до Ø 420 мм. Посадка в піч для підігріву.

2 винос: Протяжка злитку з Ø 420 мм до Ø 320 мм з наступною розрубкою на 3 частини. Посадка в піч для підігріву.

3 винос: Протяжка злитку з Ø 320 мм до Ø 235 мм .

З метою дослідження якості металу поковок були відібрані темплети від переднього кінця поковки, центральної її частини й заднього кінця поковки. Схема розкрою поковки із темплетами наведена на рис. 1.

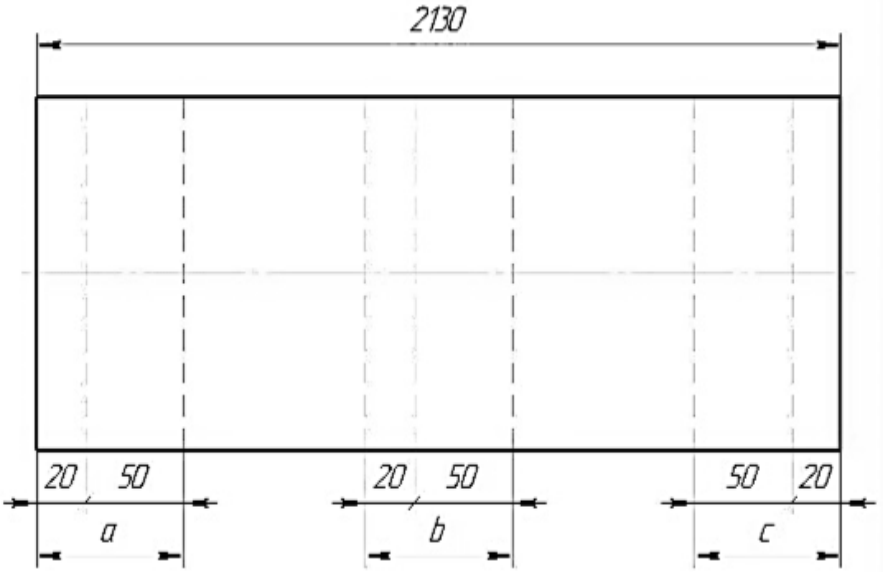


Рис. 1. Схема відбору темплетів, де:
a – передній кінець поковки; b – середина поковки; c – задній кінець поковки

З темплетів довжиною 50 мм були виготовлені зразки для механічних випробувань металу поковки. Результати механічних випробувань наведені в таблиці 2.

Темплет кованої заготовки Ø 235 мм та довжиною 20 мм був розрізаний на 4 частини й підготовлений шляхом шліфування для виявлення макроструктури. Після травління оцінена макроструктура, що наведена на рис. 2.

Таблиця 2

Результати механічних випробувань металу поковки

№ п/п	Місце розташування	Маркування	$\sigma_в$, кгс/мм^2	$\sigma_{0,2}$, кгс/мм^2	δ_5, %	Ψ, %	Ударна в'язкість, кгс·м/см^2	НВ
1	Передній кінець	центр	47,0	36,0	20,0	72,0	20,0	156
2		середина	49,5	38,5	21,0	59,0	19,9	152
3		периферія	45,0	37,5	19,0	51,0	18,3	149
1	Середина	центр	47,0	40,5	30,0	52,0	18,0	149
2		середина	47,5	39,0	20,0	56,0	20,4	152
3		периферія	48,0	41,0	25,0	60,0	23,4	152
1	Задній кінець	центр	43,0	36,0	28,0	59,0	19,8	152
2		середина	46,0	39,0	29,0	61,0	21,0	152
3		периферія	48,5	42,0	23,0	65,0	16,0	149

Як видно з рисунку, макроструктура злитка неоднорідна за перерізом. Спостерігаються зони з різною величиною зерна й різною протравленістю. В середині злитка зерна великі, наявні виділения α-фази (світлі ділянки). При цьому чітко проглядається границя між зонами, що може негативно відбиватись при пресуванні, оскільки це призводить до утворення розшарувань, тріщин й плів. Заміри твердості на темплеті показали також неоднорідність злитка. В центрі середні значення твердості за Бринелем 152…173 НВ, а на периферії 190…198 НВ.

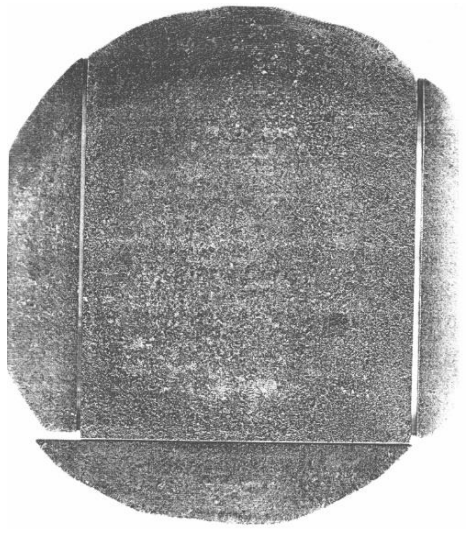


Рис. 2. Макроструктура кованої заготовки

На поверхні темплету видна тріщина довжиною 5 мм, розташована за гвинтовою лінією й така, що виходить на зовнішню поверхню (рис. 3). Крім того, спостерігаються більш дрібні тріщини довжиною до 0,1 мм. Всі перелічені дефекти злитка негативно відбиваються на деформаційній здатності при пресуванні труб й можуть призводити до різного виду дефектів продукції (пліви, надриви, тріщини й т. п.).

Слід відзначити, що механічні характеристики металу поковок достатньо високі, відповідають вимогам ГОСТ 26492-85 для катаного прутка марки ВТ1-0 (аналог Gr. 2).

Отримані куванням прутки використовували для пресування передільних труб розміром Ø 78×14 мм на горизонтальному гідравлічному пресі силою 16 МН при температурі нагріву 930 – 950 ^{0}С.

Макроструктура кільця труби після пресування, яка представлена на рис. 4, щільна, однак по зовнішній поверхні спостерігаються зони різної твердості, що свідчить про наявність аномальних структурних зон деформаційно–рекристалізаційного походження.

Наявність таких зон в кованій заготовці частково наслідується в трубах при пресуванні. Утворенню зон сприяє неоднорідність хімічного складу в мікрооб'ємах.

Крім того, однією з причин може бути нерівномірність пластичної деформації, пов'язана з наявністю зон утрудненої деформації на поверхні контакту металу з інструментом, а також нерівномірність температури за перерізом заготовок, що піддаються пресуванню, на внутрішній поверхні, або невеликі тріщини.

Рис. 3. Тріщина на зовнішній поверхні темплета (за гвинтовою лінією)

Для покращення структури й механічних властивостей, що забезпечують отримання бездефектних гарячопресованих труб, в роботі запропоновано удосконалити технологічний процес кування в умовах ВАТ «Дніпропрес Сталь», зокрема включити такі технологічні операції (всі непозначені параметри процесу відповідають описаній раніше технології).

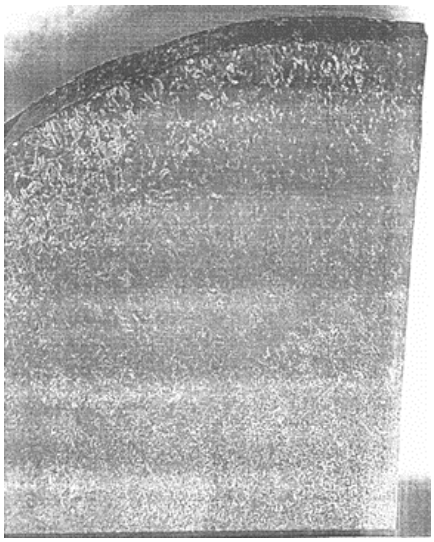


Рис. 4. Макроструктура ¼ поперечного темплета поковки

1 винос. Осадка злитка по висоті зі ступенем деформації 20 – 25 %; кантування на 90^0, осадка зі ступенем деформації 20 – 25 %; кантування на 90^0, осадка зі ступенем деформації 20 – 25 %. Посадка в піч для підігріву до температури 950 ^{0}C.

2 винос. Протяжка на квадрат 450 × 450 мм. Збивання кутів. Посадка в піч для підігріву до температури 950 ^{0}C.

3 винос. Протяжка на коло Ø 320 мм. Розрубка заготовок. Посадка в піч для підігріву до 950 ^{0}C.

4 винос: Протяжка на коло Ø 235 – 240 мм.

Для виявлення макроструктури темплет кованої заготовки розрізали на 2 частини; після шліфування й травління темплета оцінена макроструктура, яка наведена на рис. 4. Поковка має щільну, однорідну макроструктуру, яка згідно до ОСТ 92-9465-81 й ГОСТ 26492-85 відповідає 5 балу.

За діаметральним перерізом темплета з інтервалом 10 мм вимірювали твердість. Результати наведені в таблиці 3. Точка 1 відповідає краю темплета, точка 12 – центральній частині. Як бачимо, твердість за перерізом заготовки знаходиться в діапазоні 185 – 196 НВ.

Таблиця 3

Твердість за перерізом заготовки

№ заміру	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Середнє
Твердість за Брінелем (НВ)	188	196	187	195	197	185	194	196	187	187	181	192	190

Після оцінки макроструктури й вимірювання твердості були виготовлені шліфи для дослідження мікроструктури металу в поздовжньому напрямку. Оцінка макро- й мікроструктури металу поковок проведена за участю В. С. Вахрушевої й М. І. Прокоф'єва.

Мікроструктуру оцінювали, порівнюючи з еталонами шкали для α-сплавів в ОСТ 92-9465-81 (рис. 5)

Мікроструктура темплета трубної заготовки діаметром 240 мм згідно ОСТ 92-9465-81 задовільняється, відповідає 3 типу у будь-якій його точці.

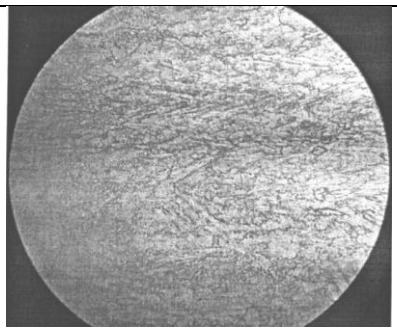
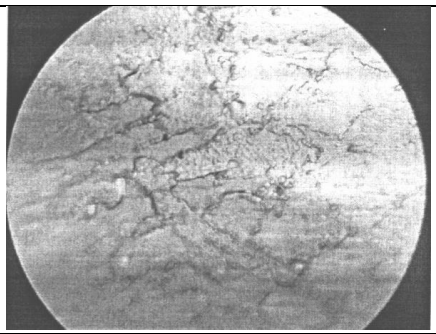
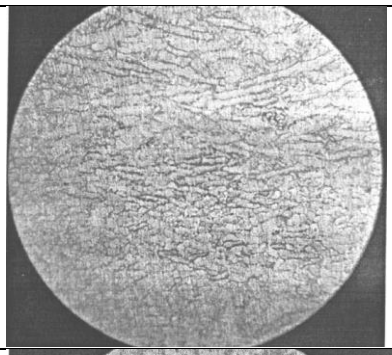
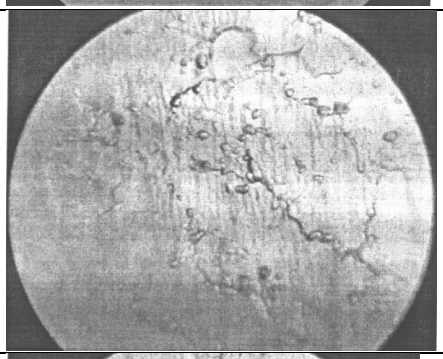
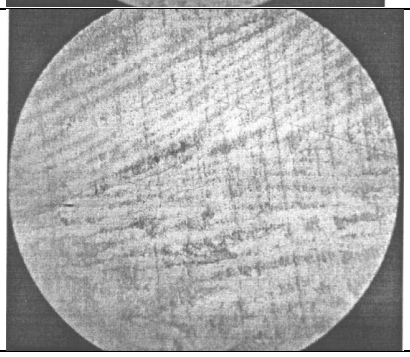
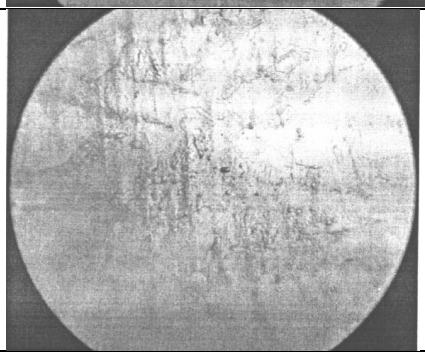
№ мікро-шліфа	× 100	× 400	Номер типу
1			3
3			3
6			3

Рис. 5. Мікроструктура по радіусу поперечного темплета від трубної заготовки діаметром 240 мм з титанового сплаву марки Grade 2

ВИСНОВКИ

Проведено аналіз існуючої технології виробництва поковок з титанових сплавів, що використовуються для виробництва труб, в умовах діючого виробництва ТОВ «Дніпропрес Сталь». Контроль якості металу отримуваних поковок показав наявність істотних відхилень у мікро- та макроструктурі поковок від параметрів, що вимагаються нормативною документацією.

Запропоновано зміни технологічного процесу як за самими операціями, так і за схемами їх виконання. Аналіз результатів кування злитків відповідно до запропонованого режиму й ме-

талографічних досліджень якості металу трубної заготовки показав, що метал по всьому перерізу має щільну макроструктуру 5-го балу, мікроструктуру 3-го типу й відповідну структуру, твердість за Брінелем 185 – 196 НВ.

Характеристики трубних заготовок, отриманих за запропонованою технологією, забезпечили бездефектне пресування передільних труб розміром Ø 78 × 14 мм на горизонтальному гідравлічному пресі 16МН при температурі нагріву заготовки 930 – 950 ºС й подальшу холодну прокатку труб розміром Ø 19,05 х 1,6 мм з механічними властивостями, що відповідають вимогам нормативної документації ASTM B 338-91a «Standard Specification for Seamless and Welded Titanium and Titanium Alloy Tubes for Condensers and Heat Exchangers».

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Balasubrahmanyam V. V., Prasad Y. V. R. K. Deformation behaviour of beta titanium alloy Ti–10V–4.5Fe–1.5Al in hot upset forging. *Materials Science and Engineering: A.* 2002. 336. 1-2, pp. 150–158. URL: https://doi.org/10.1016/s0921-5093(01)01982-7 (date of access: 28.05.2022).

2. CHEN Z.-q., et al. Characterization of hot deformation and microstructure evolution of a new metastable β titanium alloy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2022. 3. 5, pp. 1513–1529. URL: https://doi.org/10.1016/s1003-6326(22)65890-4 (date of access: 28.05.2022).

3. Mashekov S. A., et al. Formation of the structure of titanium alloy during the change of stiffness of deforming tools. *Int. J. Chem. Sci.* 2015. 13(2), pp. 801–816.

4. Fernández D. Suárez, et al. The effect of forging texture and machining parameters on the fatigue performance of titanium alloy disc components. *International Journal of Fatigue*. 2021. 142, pp. 105949. URL: https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2020.105949 (date of access: 28.05.2022).

5. ASTM B 338-91a. Standard Specification for Seamless and Welded Titanium and Titanium Alloy Tubes for Condensers and Heat Exchangers. Official edition.

Medvedev M., Bobukh O., Kuzmina O., Samsonenko A. Improvement of forging titanium alloys technology at the «Dnepropress Steel» Co.Ltd.

The article is devoted to the improvement of the titanium forging process under the conditions of Dnipropres Steel LLC. In the production of pipe billets from nickel and titanium alloys, forging of round ingots with a diameter of 350-950 mm obtained by the method of vacuum-arc or electron-beam melting is widely used. During forging of these ingots there is a significant unevenness of deformation along the cross-section of the forging, which affects the resulting structure and mechanical properties of semi-finished products, which in turn significantly limits the technological possibilities of their processing. According to the previous technology of forging of a pipe billet from titanium alloy of Grade 2 (domestic analogue of VT1-0), it consisted in drawing of a billet Ø 630 mm with a length of 1300-1500 mm in three passes with intermediate heating. According to the results of the study of the quality of the metal template, it was determined that the macrostructure of the forging is heterogeneous in the cross section, there are zones with different grain sizes and different etching. Inside the grain of the forging, there are large accessible allocations of the α-phase with a clear boundary between the zones, which can be negatively affected during extrusion, as it leads to the formation of cracks and delaminations.

To improve the structure and mechanical properties that ensure the production of defect-free hot-extruded pipes, it is proposed to improve the technological process of forging in the conditions of OJSC "Dnipropres Steel" by changing the deformation parameters and additional operations. Analysis of the results of forging ingots according to the proposed regime and metallographic studies of the quality of the metal of the pipe billet showed that the metal throughout the cross-section has a dense macrostructure of the 5th grade, a microstructure of the 3rd type, Brinell hardness 185-196 HB, which subsequently ensures defect-free extrusion of the pipe billets and their subsequent cold rolling to obtain mechanical properties that meet the requirements of the ASTM B 338-91a "Standard Specification for Seamless and Welded Titanium and Titanium Alloy Pipes for Condensers and Heat Exchangers".

Keywords: *forging technology, titanium alloys, tube billets, micro- and macrostructure.*

Медведев М. И., Бобух А. С., Кузьмина О. М., Самсоненко А. А. Совершенствование технологии ковки трубных заготовок из титановых сплавов в условиях ООО "Днепропресс Сталь".

Работа посвящена усовершенствованию процесса ковки титановых в условиях ООО «Днепропресс Сталь». При производстве трубных заготовок из никелевых и титановых сплавов широко применяется ковка круглых слитков диаметром 350 – 950 мм, получаемых методом вакуумно-дуговой или электронно-лучевой плавки. При ковке таких слитков возникает значительная неравномерность деформации по сечению поковки, что влияет на получаемые структуру и механические свойства полупродукта, а это в свою очередь существенно ограничивает технологические возможности их дальнейшей обработки. По существующей технологии ковка трубной заготовки из титанового сплава Grade 2 (отечественный аналог ВТ1-0) состояла из протяжки заготовки Ø 630 мм длиной 1300-1500 мм за три выноса с промежуточным подогревом. По результатам исследований темплет на качество металла было обнаружено, что макроструктура поковки неоднородна по

сечению, наблюдаются зоны с разной величиной зерна и разной протравленностью. Внутри поковки зерна большие, имеются выделения α-фазы, с четкой границей между зонами, что может негативно отражаться при прессовании, поскольку это приводит к образованию расслоений, трещин и плен.

Для улучшения структуры и механических свойств, обеспечивающих получение бездефектных горячепрессованных труб, предложено усовершенствовать технологический процесс ковки в условиях ОАО «Днепропресс Сталь» за счет изменения параметров деформации и введения дополнительных операций. Анализ результатов ковки слитков в соответствии с предложенными режимами с помощью металлографических исследований качества металла трубной заготовки показал, что по всему сечению наблюдается плотная макроструктура 5-го балла, микроструктура 3-го типа, твердость по Бринеллю 185 – 196 НВ, что в дальнейшем обеспечивает бездефектное прессование передельных труб и их последующую холодную прокатку с получением механических свойств, отвечающих требованиям нормативной документации ASTM B 338-91a «Standard Specification for Seamless and Welded Titanium and Titanium Alloy Tubes for Condensers and Heat Exchangers».

***Ключевые слова**: технология ковки, титановые сплавы, трубная заготовка, микро- и макроструктура.*

Медведєв Михайло Іванович – д-р техн. наук, ст. наук. співробітник УДУНТ
Medvedev Michael – Doctor of Technical Sciences, Senior Research Scientist USUST
Медведев Михаил Иванович – д-р техн. наук, ст. науч. сотрудник УГУНТ
Email: m.i.medvedev@ust.edu.ua
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1230-420X

Бобух Олександр Сергійович – канд. техн. наук, доц. УДУНТ
Bobukh Oleksandr – Candidate of Technical Science, Associate Professor,USUST
Бобух Александр Сергеевич – канд. техн. наук, доц. УГУНТ
Email: o.s.bobukh@ust.edu.ua
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7254-3854

Кузьміна Ольга Михайлівна – канд. техн. наук, доц. УДУНТ
Kuzmina Olga – Candidate of Technical Science, Associate Professor USUST
Кузьмина Ольга Михайловна – канд. техн. наук, доц. УГУНТ
Email: o.m.kuzmina@ust.edu.ua
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0794-0583

Самсоненко Андрій Анатолійович – канд. техн. наук, доц. УДУНТ
Samsonenko Andrii – Candidate of Technical Science, Associate Professor
Самсоненко Андрей Анатольевич – канд. техн. наук, доц. УГУНТ
Email: a.a.samsonenko@ust.edu.ua
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6992-2327

УДУНТ – Український державний університет науки і технологій, м. Дніпро
USUST – Ukrainian State University of Science and Technologies, Dnipro
УГУНТ – Украинский государственный университет науки и технологий, г. Днепр

Стаття надійшла до редакції 10.06.22 р.

УДК 621.77.01 DOI: 10.37142/2076-2151/2022-1(51)87

Михалевич В. М.
Матвійчук В. А.
Колісник М. А.

ОЦІНКА ДЕФОРМОВНОСТІ МАТЕРІАЛУ ЗАГОТОВОК ПРИ ПРЯМОМУ ВИДАВЛЮВАННІ МЕТОДОМ ШТАМПУВАННЯ ОБКОЧУВАННЯМ

В статті приведені результати розробки і дослідження технологічної схеми прямого видавлювання методом штампування обкочуванням конічним валком для отримання складно профільних заготовок. Оскільки технологічні можливості при цьому залежать від деформовності матеріалу, то був проведений аналіз напружено-деформованого стану заготовок з використанням методу сіток, вимірювання твердості та мікроструктурного аналізу. Головним результатом аналізу стала побудова шляхів деформування часток матеріалу заготовок в координатах «інтенсивність деформацій – показник напруженого стану». Встановлені зони заготовок, які деформуються в умовах «жорсткого» напруженого стану, тому саме для цих зон проведена оцінка деформовності металів. Для оцінки деформовності матеріалу заготовок побудували модель накопичення пошкоджень, що базується на критерії В. Огороднікова та певної методики побудови апроксимації кривої граничних деформацій. З результатів дослідження деформовності матеріалу заготовок випливає, що у порівнянні з лінійним принципом накопичення пошкоджень, розрахунок за моделлю, що базується на критерії В. А. Огороднікова знижує розрахункове значення граничної деформації. В той же час призначення параметру нелінійності накопичення пошкодження значень, що задовольняють умові $n > 1$, призводить до підвищення розрахункового значення граничної деформації у порівнянні з лінійним принципом накопичення пошкоджень.

Ключові слова: *складно профільна заготовка, штампування обкочуванням, конічний валок, пряме видавлювання, напружено-деформований стан, деформовність.*

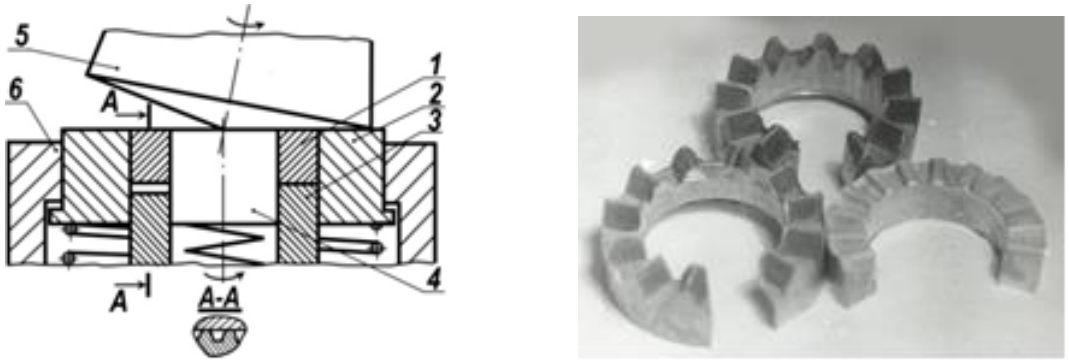
Сучасна металообробка передбачає забезпечення високої ефективності виробництва, що досягається широким використанням у якості заготівельних операцій процесів обробки металів тиском (ОМТ). Особливо суттєвий ефект досягається при виготовленні методами ОМТ складно профільних заготовок. Труднощі, при застосуванні таких методів, пов'язані із можливістю отримання заготовок необхідної форми через складність управління механікою формозміни при використанні того чи іншого інструменту (оснащення). У разі вирішення відзначеної проблеми виникає можливість виготовлення заготовок із досягненням значних деформацій. А це, в свою чергу, обумовлює небезпеку руйнування матеріалу заготовок, в силу його недостатньої деформовності [1, 2, 3].

Велику номенклатуру виробів дозволяють виготовляти процеси видавлювання: прямого, зворотного, бокового, радіального, комбінованого. Ці процеси набули широкого розвитку завдяки результатам досліджень І. С. Алієва, Л. І. Алієвої [2, 3]. Значною мірою вирішувати проблеми виготовлення заготовок складно профільних деталей дозволяє процес штампування обкочуванням (ШО) [1, 4]. Його характерною відмінністю є то, що зона деформації має локальний характер, а формування заготовки відбувається внаслідок багатократного її обкочування циліндричним або конічним валками. Це покращує умови плину матеріалу заготовки на контакті з інструментом і дозволяє отримувати розвинуті тонкостінні елементи. При цьому необхідний профіль виробів можна отримати шляхом застосування обґрунтованих технологічних схем, а також шляхом цілеспрямованого взаємного розташування деформівних валків і заготовки [5]. Як показано в роботі [6], при використанні операції зворотного видавлювання методом ШО в зоні деформування реалізується м'яка схема напруженого стану, що забезпечує сприятливі умови деформовності і розширює технологічні можливості процесу порівняно з традиційним видавлюванням. Сприяє підвищенню ефективності використання процесів ШО і розробка штампів з диференційним затиском для різання заготовок під точне штампування [7]. Проте невирішеною залишається проблема оцінки деформовності матеріалу заготовок в процесах прямого видавлювання методом ШО.

Для реалізації поставлених завдань нами був досліджений напружено-деформований стан (НДС) матеріалу заготовок при прямому вдавлюванні методом ШО [8]. Існують методи оцінки деформовності матеріалів, що базуються на критерії В. Огороднікова [9] та певної методики побудови апроксимації кривої граничних деформацій [1, 10–13].

Метою даної роботи є розробка і реалізація схем прямого вдавлювання методом ШО і оцінка деформовності матеріалу складно профільних заготовок для запобігання браку від руйнування та забезпечення високих службових характеристик виробів.

На рис. 1 показана технологічна схема, з використанням якої нами досліджувалася можливість формувати елементи складно профільних деталей.



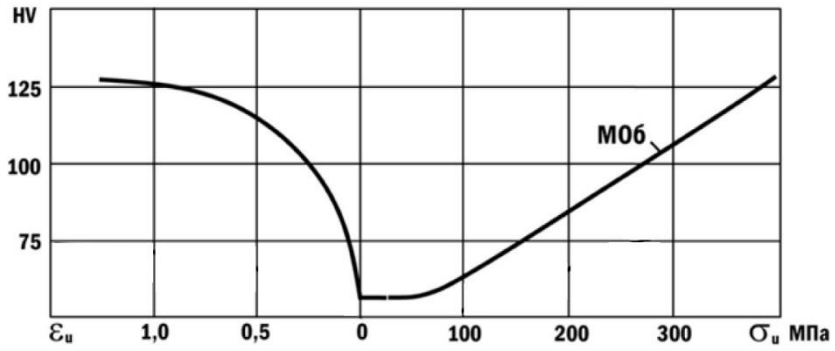
а б

Рис. 1. Схема штампування обкочуванням кільцевої заготовки конічним валком 1,а та вигляд деформованих до різних ступенів заготовок 1,б:

1 – заготовка, 2 – зовнішня оправка, 3 – матриця, 4 – внутрішня оправка, 5 – валок, 6 – шпиндель

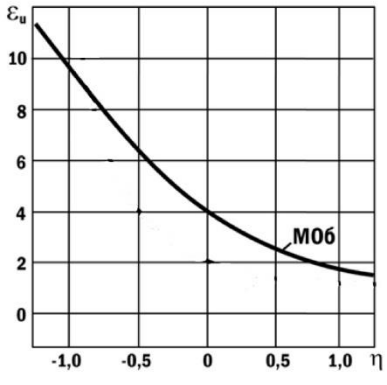
Реалізація обкочування за схемою на рис. 1,а забезпечує операцію прямого видавлювання або калібрування заготовки зі сторони, протилежної валку. На рис. 1,б показані здеформовані до різних ступенів заготовки. Операція пряме видавлювання методом ШО була реалізована нами для виготовлення зубчастої муфти. В якості матеріалу заготовки була використана мідь М0б.

Для оцінки технологічних можливостей ШО були побудовані для міді М0б градуювальний графік в координатах «інтенсивність деформацій (ε_i) – твердість (HV) – інтенсивність напружень (σ_i)» рис. 2 і крива граничних деформацій рис. 3. Тут $\eta = I_1(T_\sigma)/\sqrt{3I_2(D_\sigma)}$ – показник напруженого стану, $I_1(T_\sigma)$ і $I_2(D_\sigma)$ – перший інваріант тензора і другий інваріант девіатора напружень.



а

Рис. 2. Градуювальний графік міді М0б



б

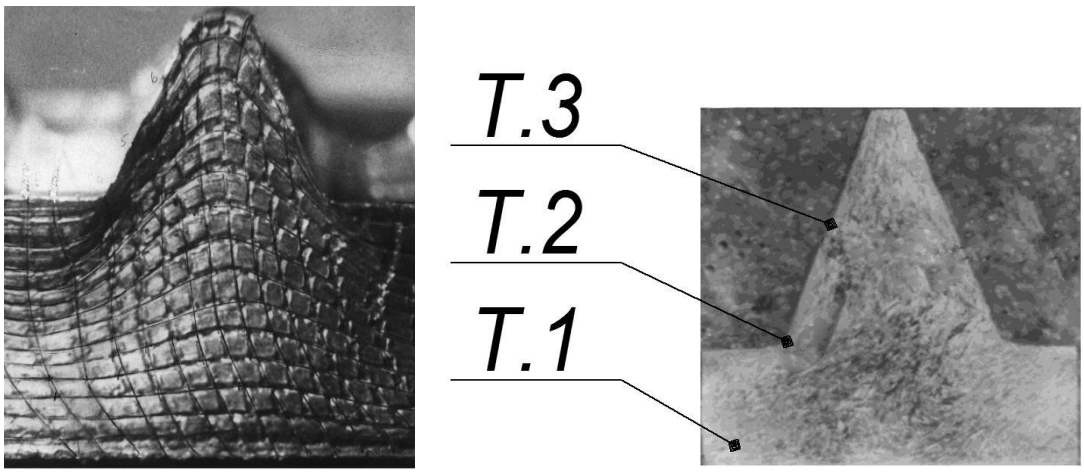
Рис. 3. Крива граничних деформацій М0б

Використання мідних заготовок обґрунтовано можливістю достатньо точно визначати до значних степенів деформації за результатами вимірювання твердості HV не лише інтенсивність напружень (σ_i), але і інтенсивність деформацій (ε_i).

Аналіз НДС матеріалу муфт проводили із використанням методу сіток, вимірювання твердості та мікроструктурного аналізу.

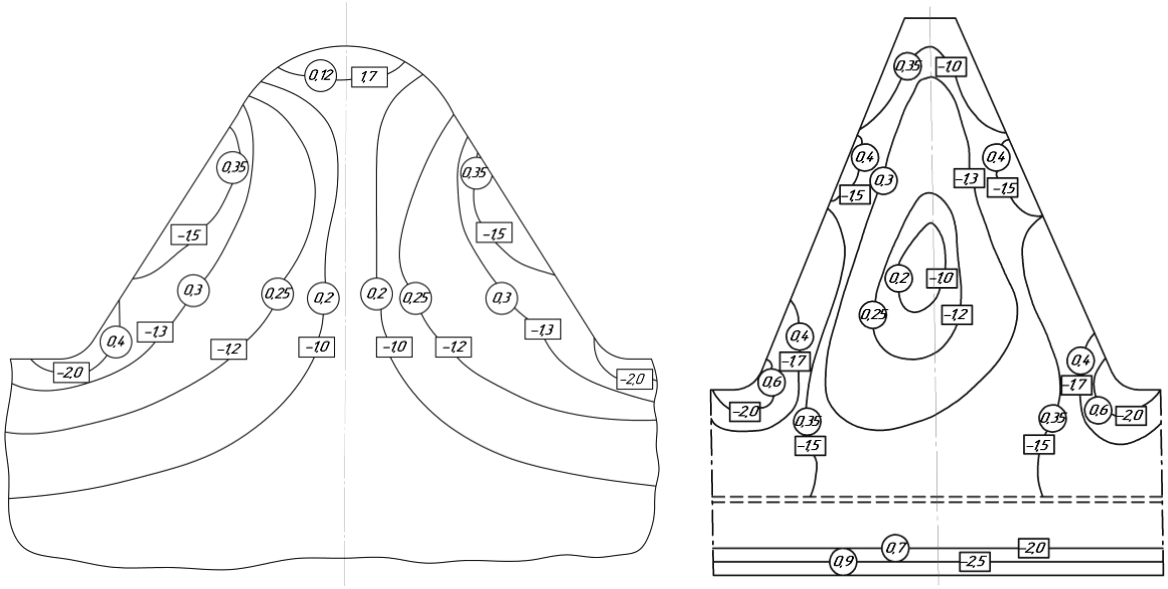
На рис. 4 приведено вигляд здеформованої ділильної сітки і мікроструктури сформованого елементу кулачкової муфти

На рис. 5 приведений характер розподілу інтенсивності деформацій ε_i і показника напруженого стану η по елементу заготовки, отриманому видавлюванням методом ШО на проміжній а) і заключній б) стадіях.



а б

Рис. 4. Вигляд здеформованої ділильної сітки і мікроструктури елементу кулачкової муфти



а б

Рис. 5. Характер розподілу параметрів НДС по елементу заготовки, отриманому видавлюванням методом ШО на проміжній а) і заключній б) стадіях: $\eta = const$ (□) і $\varepsilon_i = const$ (○)

Дослідження НДС матеріалу заготовки методом вимірювання твердості проводили за методикою, приведеною в роботі [11]. Розподіл інтенсивності деформацій в зоні витиснутого елемента (див. рис. 5), отриманий методом вимірювання твердості, свідчить про досить нерівномірний характер деформованого стану в перерізі заготовки. Найбільша інтенсивність деформацій, яка спостерігається в зоні контакту валка із заготовкою, сягає значень $\varepsilon_i = 0,9-1,0$ та може їх перевищувати. Наступною, найбільш здеформованою, є зона входу металу в формоутворюючий канал. Тут інтенсивність деформацій сягає значень $\varepsilon_i = 0,6-0,7.$ Найменший рівень деформацій спостерігається на вільній вершині витиснутого елемента та в його центральній частині, а інтенсивність деформацій тут сягає значень $\varepsilon_i = 0,1-0,2.$

Для дослідження НДС пластичної зони заготовки при прямому витискуванні методом ШО нами застосовано також метод координатних подільних сіток, побудований на використанні методики, основаної на теорії *R*-функцій [1]. При цьому здійснювалося поетапне видавлювання елемента (див. рис. 1,а) - плоска задача. Характер розподілу ізоліній $\varepsilon_i = const$ в зоні витиснутого елементу, отриманий за результатами вимірювання координатної подільної сітки, співпадає з отриманим за результатами вимірювання твердості. Показник напруженого стану в зоні максимальних деформацій становить $\eta = -2,5...-2,0$ (див. рис. 5). Ці умови свідчать про наявність тут значних напружень стиску, що робить відносно безпечною деформовність матеріалу заготовки. Матеріал заготовки у вершини зуба підлягає відносно невеликим деформаціям, проте показник напруженого стану тут $\eta > +1$, що вимагає проведення оцінки деформовності матеріалу.

Важливою особливістю даної технологічної схеми є те, що частки металу з вільної вершини зуба і «жорсткої» схеми напруженого стану, в процесі видавлювання переходять на контакт з інструментом, де їх деформації продовжують зростати в умовах «м'якої» схеми напруженого стану (η= -1,3…-1,5). Все це слід враховувати при побудові шляхів деформування часток матеріалу заготовки, для оцінки його деформовності.

При зміні параметрів профілю елемента, що характеризується величинами, приведеними на рис. 6, значення інтенсивності деформацій і показника напруженого стану будуть дещо змінюватися, проте характер їх розподілу зберігатиметься. Зберігатиметься також характер розподілу відзначених величин і при зміні матеріалів, якщо умови тертя залишатимуться незмінними.

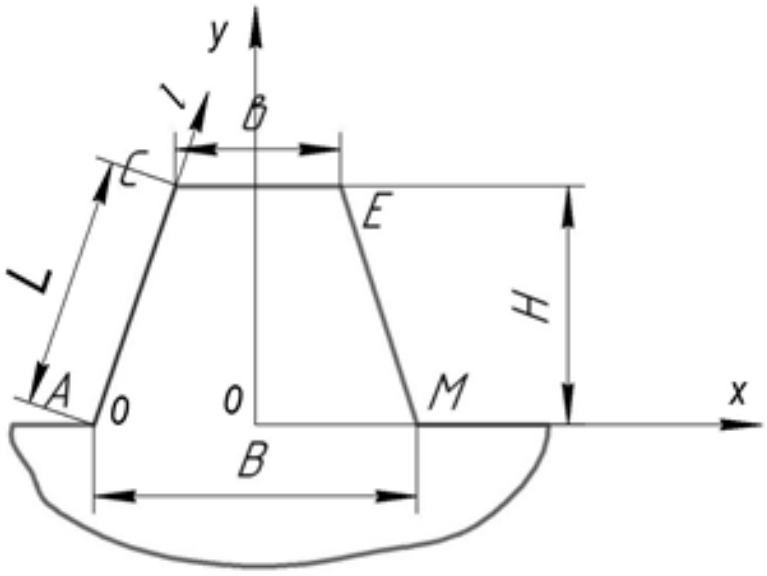


Рис. 6. Характерні параметри профілю елемента, що витискується

Для оцінки деформовності матеріалу заготовки та визначення граничних розмірів, з точки зору запобігання руйнуванню матеріалу або забезпечення необхідних технічних характеристик деталі, необхідно мати шляхи деформування часток небезпечних зон. На рис. 7 приведені шляхи деформування часток матеріалу заготовки в найбільш деформованих зонах, отримані методом координатних подільних сіток з використанням теорії *R*-функцій.

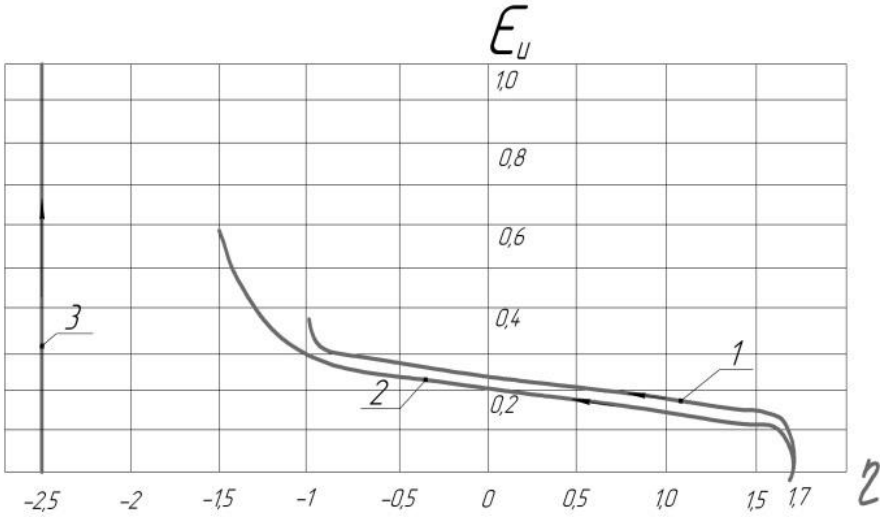


Рис. 7. Шляхи деформування часток матеріалу заготовки в найбільш деформованих зонах: 1 – посередині бічної поверхні АС; 2 – на вході в формоутворюючий канал (поблизу точки А); 3 – в зоні контакту заготовки з валком

Особливість шляхів деформування полягає у тому, що на початковому етапі видавлювання матеріал на лінії ОМ підлягає розтягу при показнику напруженого стану η = 1,73. При цьому величина інтенсивності деформацій є незначною, досягаючи для вільної поверхні на заключному етапі формоутворення значень $\varepsilon_i = 0,15 - 0,2$. В подальшому, при контакті з бічною поверхнею каналу матриці, деформування продовжується в умовах η = -1,0 – -1,5. Для найбільш деформованої приконтактної з валком зони заготовки шлях деформування 3 можна представити за середнім в зоні натискання валка значенням показника η = -2,5...-2.

Вибір критеріального підходу для оцінки деформовності матеріалу заготовок при ШО залежить, головним чином, від виду деформування: просте чи складне. При прямому видавлюванні методом ШО шляхи деформування мають відзначену вище особливість.

Побудова математичної моделі деформовності небезпечних зон заготовки передбачає побудову відповідних шляхів деформування. Для моделювання шляхів деформування, що зображені траєкторіями 1, 2 на рис. 7 нами сконструйована параметрично задана функція

$$\begin{cases} \eta(t) = \dfrac{b\cdot\left(tg(t)-t\right)+a\cdot\sqrt{1+c}\cdot t}{\sqrt{tg^2(t)+c\cdot t^2}} \\ \bar{e}_{eq}(t) = m\cdot\int_0^t\sqrt{\dfrac{1}{\cos^4 x}+3}\cdot dx \end{cases}, \quad t\in\left(0,\frac{\pi}{2}\right), \tag{1}$$

де a, b, c, m – параметри апроксимації.

Перевіримо, чи задовольняє запропонована модель шляхів деформування деяким граничним умовам:

$$1. \quad \lim_{t\to 0+}\eta(t) = 1.7. \tag{2}$$

$$2.\quad \lim_{t\to\frac{\pi}{2}-0}\eta(t)=-1.5\div-1. \tag{3}$$

1.

Дійсно, для першої умови маємо

$$\lim_{t\to 0+}\eta(t)=\lim_{t\to 0+}\frac{b\cdot\left(tg(t)-t\right)+a\cdot\sqrt{1+c}\cdot t}{\sqrt{tg^2(t)+c\cdot t^2}}=$$

$$=\lim_{t\to 0+}\frac{b\cdot\dfrac{tg(t)}{tg(t)}+\left(a\cdot\sqrt{1+c}-b\right)\cdot\dfrac{t}{tg(t)}}{\sqrt{\dfrac{tg^2(t)}{tg^2(t)}+c\cdot\dfrac{t^2}{tg^2(t)}}} \tag{4}$$

З урахуванням першої визначної границі

$$\lim_{t\to 0}\frac{\sin(t)}{t}=1 \qquad \text{та умови} \quad \lim_{t\to 0}\cos(t)=1,$$

Матимемо

$$\lim_{t\to 0+}\eta(t)=a \quad . \tag{5}$$

Звідси випливає, що параметр a дорівнює $a=1.7$.

Для другої умови на основі (1) можемо записати

$$\lim_{t\to\frac{\pi}{2}-0}\eta(t)=\lim_{t\to\frac{\pi}{2}-0}\frac{b\cdot\left(tg(t)-t\right)+a\cdot\sqrt{1+c}\cdot t}{\sqrt{tg^2(t)+c\cdot t^2}}=$$

$$=\lim_{t\to\frac{\pi}{2}-0}\frac{b\cdot\dfrac{tg(t)}{tg(t)}+\left(a\cdot\sqrt{1+c}-b\right)\cdot\dfrac{t}{tg(t)}}{\sqrt{\dfrac{tg^2(t)}{tg^2(t)}+c\cdot\dfrac{t^2}{tg^2(t)}}} \tag{6}$$

З урахуванням того, що $\lim_{t\to\frac{\pi}{2}-0}\dfrac{t}{tg(t)}=0$,

Матимемо

$$\lim_{t\to\frac{\pi}{2}-0}\eta(t)=b. \tag{7}$$

Отже вибір значення параметра b з діапазону, що вказаний в граничній умові, визначає стадію процесу деформування заготовки під час її контакту з бічною поверхнею каналу матриці.

Неважко показати, також, що

$$\lim_{c\to 0+}\eta(t)=b+(a-b)\cdot\frac{t}{tg(t)},\quad \lim_{c\to+\infty}\eta(t)=a.$$

В певній мірі, вплив вибору конкретного значення цього параметра на форму траєкторії деформування може бути відображений вибором відповідного значення параметра m

На рис. 8. відображено вплив вибору значень параметрів функції на форму траєкторії деформування.

Для оцінки деформовності матеріалу заготовок на основі критерію В. Огороднікова [9] була побудована модель накопичення пошкоджень у вигляді

$$\psi(t)=\int_0^t\frac{n\cdot m^n\cdot\left(\int_0^x\sqrt{\frac{1}{\cos^4\tau}+3}\cdot d\tau\right)^{n-1}}{\left(\varepsilon_{*s}\left[\eta(x)\right]\right)^n}\cdot\sqrt{\frac{1}{\cos^4 x}+3}\cdot dx,\qquad(8)$$

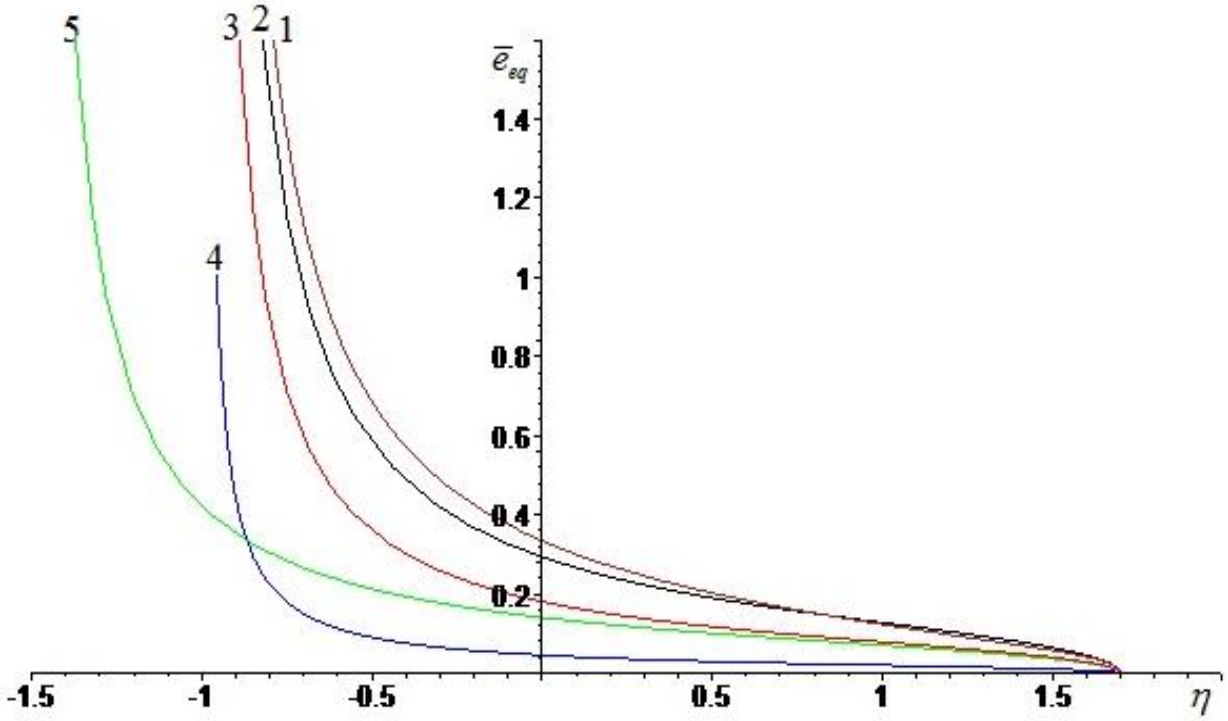


Рис. 8. Траєкторії деформування: розрахунки за (4.11), $a=1.7$; 1÷4 - $b=-1$; 5 - $b=-1.5$; 2, 3, 4 - $c=0.1$; 1 - $c=30$; 1 - $c=0.08$; 1÷5 - $m=0.02, 0.065, 0.04, 0.01, 0.04$.

$$n=1+0.2\cdot arctg\left(\frac{d\eta}{d\bar{e}_{eq}}\right).\qquad(9)$$

Використовуватимемо трипараметричну апроксимацію кривої граничних деформацій при стаціонарному деформуванні:

$$\varepsilon_{*s}(\eta)=\varepsilon_{*s}(\eta=0)\cdot\left(\frac{\varepsilon_{*s}(\eta=1)}{\varepsilon_{*s}(\eta=-1)}\right)^{\frac{\eta}{2}}\cdot\left(\frac{\varepsilon_{*s}(\eta=-1)\cdot\varepsilon_{*s}(\eta=1)}{\left[\varepsilon_{*s}(\eta=0)\right]^2}\right)^{\frac{\eta^2}{2}},\qquad(10)$$

Тоді крива накопичення пошкоджень в координатах $\eta-\psi$ набуває такого вигляду

$$\begin{cases}\eta(t)=\dfrac{b\cdot\left(tg(t)-t\right)+a\cdot\sqrt{1+c}\cdot t}{\sqrt{tg^2(t)+c\cdot t^2}},\\ \psi(t)=\displaystyle\int_0^t\frac{n\cdot m^n\cdot\left(\int_0^x\sqrt{\frac{1}{\cos^4\tau}+3}\cdot d\tau\right)^{n-1}\cdot\sqrt{\frac{1}{\cos^4 x}+3}}{\left(\bar{\varepsilon}_{fs}(\eta=0)\cdot\left(\frac{\bar{\varepsilon}_{fs}(\eta=1)}{\bar{\varepsilon}_{fs}(\eta=-1)}\right)^{\frac{\eta(x)}{2}}\cdot\left(\frac{\bar{\varepsilon}_{fs}(\eta=1)\cdot\bar{\varepsilon}_{fs}(\eta=-1)}{\varepsilon_{fs}^2(\eta=0)}\right)^{\frac{\eta^2(x)}{2}}\right)^n}\cdot dx,\ t\in\left[0,\frac{\pi}{2}\right[\end{cases},\qquad(11)$$

Похідна $\dfrac{d\eta}{d\bar{e}_{eq}}$ визначається, як похідна параметрично заданої функції (1). В результаті, модель (8), (11) набуває доволі громіздкого вигляду.

Аналіз траєкторій деформування, що зображені на рис. 7, свідчить, що на початковій стадії деформування, що супроводжується різкою зміною напруженого стану від 1.7 до від'ємних значень, швидкість $\dfrac{d\eta}{d\bar{e}_{eq}}$ можна вважати сталою та яка різних траєкторій змінюється приблизно в діапазоні від -17 до -4. У цьому випадку, відповідно до (9), значення параметра нелінійності n належить діапазону 0.69÷0.73.

На заключній стадії деформування, відповідно до форми траєкторій деформування, показник напруженого стану майже не змінюється на тлі значного збільшення накопиченої деформації. Отже, розрахункова величина накопичення пошкоджень на цій стадії практично не залежить від значення показника нелінійності накопичення пошкоджень n. Це означає, що моделювання деформовності при прямому видавлюванні методом штампування обкочуванням можна здійснювати за умови $n=n_i=const$.

При n=1 – матимемо лінійний принцип накопичення пошкоджень, відповідно якого на основі (11) матимемо

$$\begin{cases}\eta(t)=\dfrac{b\cdot\left(tg(t)-t\right)+a\cdot\sqrt{1+c}\cdot t}{\sqrt{tg^2(t)+c\cdot t^2}},\\ \psi(t)=m\cdot\displaystyle\int_0^t\frac{\sqrt{\frac{1}{\cos^4 x}+3}}{\bar{\varepsilon}_{fs}(\eta=0)\cdot\left(\frac{\bar{\varepsilon}_{fs}(\eta=1)}{\bar{\varepsilon}_{fs}(\eta=-1)}\right)^{\frac{\eta(x)}{2}}\cdot\left(\frac{\bar{\varepsilon}_{fs}(\eta=1)\cdot\bar{\varepsilon}_{fs}(\eta=-1)}{\varepsilon_{fs}^2(\eta=0)}\right)^{\frac{\eta^2(x)}{2}}}\cdot dx,\ t\in\left[0,\frac{\pi}{2}\right[\end{cases},\qquad(12)$$

Результати моделювання деформовності за вказаних умов показано на рис. 9.

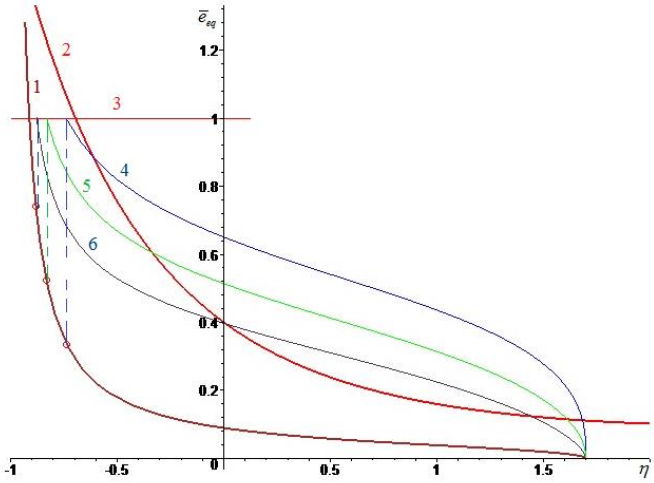


Рис. 9. Дослідження деформовності матеріалу заготовок при прямому витискуванні методом ШО:

1 – траєкторія деформування (1), a = 1.7, b = -1, c = 0.08, m = 0.02; 2 – крива граничних деформацій сталі 14Х17Н2 – розрахунок за (11) при $\varepsilon_{*S}\left(\eta=-1\right)=1.6$, $\varepsilon_{*S}\left(\eta=0\right)=0.4$, $\varepsilon_{*S}\left(\eta=1\right)=0.16$; 4, 5, 6 – криві накопичення пошкоджень – розрахунок за (11) при n =0.73, 1, 1.27; ∘ – розрахункові значення граничної деформації

Із представлених даних видно, що розрахункові значення координат критичних точок для досліджуваної траєкторії деформування нехтовно мало відрізняються один від одного за значенням показника напруженого стану η та суттєво відрізняються за величиною граничної деформації. В усіх випадках розрахункові значення граничної деформації в 2 ÷ 4 рази менше, ніж значення накопиченої деформації в точці перетину розглядуваної траєкторії з кривої граничних деформацій при стаціонарному навантаженні.

ВИСНОВКИ

1. В роботі проведено розробку і дослідження технологічної схеми прямого вдавлювання методом штампування обкочуванням, в результаті чого доведено, що даний процес дозволяє отримувати складнопрофільні заготовки високої якості.

2. Можливості прямого вдавлювання методом ШО обмежені складністю передачі зусилля від валка на протилежну торцеву частину заготовки, та значними контактними напруженнями. Тому дана операція підходить більш для здійснення калібрування або формування незначних за розміром елементів заготовки.

3. За результатами дослідження напружено-деформованого стану матеріалу заготовок при прямому видавлюванні методом ШО, побудови кривих граничних деформацій та з дослідження деформовності матеріалу заготовок випливає, що у порівнянні з лінійним принципом накопичення пошкоджень, розрахунок за моделлю, що базується на критерії В. А. Огороднікова знижує розрахункове значення граничної деформації. В той же час призначення параметру нелінійності накопичення пошкодження значень (9), що задовольняють умову $n>1$, призводить до підвищення розрахункового значення граничної деформації у порівнянні з лінійним принципом накопичення пошкоджень.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРИ

1. Матвийчук В. А., Алиев И. С. Совершенствование процессов локальной ротационной обработки давлением на основе анализа деформируемости металлов: монография. Краматорск: ДГМА. 2009. 268 с.

2. Алієв І. С. Методи пошуку нових технологічних способів видавлювання. Теорія та практика обробки матеріалів тиском. Колективна монографія. Запоріжжя: Мотор-Січ. 2016. С. 364-485. ISBN 978-966-2906-60-8.

3. Алиева Л. И., Жбанков Я. Г. Перспективы развития процессов точной объемной штамповки. *Вісник ДДМА: зб. наук. праць.* Краматорськ: ДДМА. 2008. 1 (11). С. 13–19.

4. Виноградов Л. В., Матвийчук В. А., Мочалов С. М. Технологические возможности ротационного деформирования. *Кузнечно-штамповочное производство*. 1989. 4. С. 14–16.

5. Краєвський В. О., Матвійчук В. А., Михалевич В. М. Вплив технологічних параметрів на кінематику холодного торцевого розкочування. *Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в машинобудуванні і металургії.* Краматорськ-Слов'янськ. 2003. С. 286–291.

6. Матвійчук В. А. ,. Колісник М. А, Любін М. В. Розробка і дослідження процесів штампування обкочуванням складно профільних заготовок. *Техніка, енергетика, транспорт АПК.* 2018. 4(103). С. 56–63.

7. Карнаух С. Г., Алієв І. С., Матвійчук В. А., Таган Л. В. Розробка штампів з диференційним затиском для різання заготовок під точне штампування. *Техніка, енергетика, транспорт АПК.* 2021. 4 (115). С. 66–74.

8. Матвійчук В. А., Колісник М. А., Штуць А. А. Дослідження напружено-деформовного стану матеріалу заготовок при прямому витискуванні методом штампування обкочування. *Техніка, енергетика, транспорт АПК.* 2018. № 3(102). С. 77–84.

9. Огородников В. А. Оценка деформируемости металлов при обработке давлением. Киев*:* Вища школа. 1983. С. 175 .

10. Дель Г. Д. Определение напряжений в пластической области по распределению твёрдости. Москва: Машиностроение. 1971. 200 с.

11. Gundebommu S. L., Matvijchuk V., Rubanenko O., Branitskiy Yu. Justification and development of methods building curves boundary deformation of metals. *Materials Today: Proceedings*, 2021, 38, pp. 3337–3344.

12. Matvijchuk V., Shtuts A., Kolisnyk M., Kupchuk I., Derevenko I. Investigation of the tubular and cylindrical billets stamping by rolling process with the use of computer simulation. *Periodica Polytechnica, Mechanical Engineering*. 2022. 1 (66), pp. 51–58.

13. Kupchuk I., Kolisnyk M., Shtuts A., Paladii M. Development of the technological process of forming rings from sheet samples by stamping rollers and rotary hood. *Bulletin of the Transilvania University of Braşov. Series I: Engineering Sciences.* 2021. 14 (63). 2, pp. 1–13.

REFERENCES

1. Matviychuk V. A., Aliiev I. S. Improvement of processes of local rotational processing by pressure on the basis of the analysis of deformability of metals: monograph. Kramatorsk: DSEA. 2009. 268 p. *[in Russian]*.

2. Aliiev I.S. Methods to search for new technological methods of visualization. Theory and practice of processing materials with a vice. Collective monograph. Zaporizhzhya: Motor-Sich. 2016. S. 364-485. ISBN 978-966-2906-60-8. *[in Ukranian]*.

3. Aliieva L.I., Zhbankov. Ya.G. Prospects for the development of precision forging processes. *Bulletin of DSEA*. Kramatorsk: DSEA. 2008. 1(11), pp. 13–19. *[in Russian]*.

4. Vinogradov L.V., Matviychuk V.A., Mochalov S.M. Technological possibilities of rotational deformation. *Forging and stamping production*. 1989. 4. S. 14-16.

5. Kraevskyi V.O., Matviychuk V.A., Mikhalevich V.M. Influence of technological parameters on the kinematics of cold end rolling. *Improvement of pressure treatment processes and equipment in mechanical engineering and metallurgy*. Kramatorsk-Slovyansk. 2003, pp. 286–291. *[in Ukranian]*.

6. Matviychuk V.A.,. Kolisnyk M.A., Lyubin M.V. Development and research of processes of stamping by rolling of complex profile blanks. *Engineering, energy, transport of agro-industrial complex.* 2018. 4(103), pp. 56-63. *[in Ukrainian]*.

7. Karnaukh S.G., Aliiev I.S., Matviychuk V.A., Tahan L.V. Development dies with a differential seal for cutting blanks for exact stamping. *Engineering, energy, transport of agro-industrial complex*. 2021. 4 (115), pp. 66-74.

8. Matviychuk V.A., Kolisnyk M.A., Shtuts A.A. Investigation of the stress-strain state of the workpiece material during direct extrusion by rolling stamping. *Engineering, energy, transport of agro-industrial complex.* 2018. 3 (102), pp. 77-84. *[in Ukrainian]*.

9. Ogorodnikov V.A. Estimation of deformability of metals during pressure treatment. Kyiv: *Higher school*. 1983. 175 p. *[in Russian]*.

10. Del G.D. Determination of stress in the plastic region by hardness distribution. Moscow: Mechanical engineering. 1971. 200 p. *[in Russian]*.

11. Gundebommu L., Matvijchuk V., Rubanenko O., Branitskiy Yu. Justification and development of methods building curves boundary deformation of metals. *Materials Today: Proceedings*. 2021. 38, pp. 3337–3344.

12. Matvijchuk V., Shtuts A., M. Kolisnyk., Kupchuk I., Derevenko I. Investigation of the tubular and cylindrical billets stamping by rolling process with the use of computer simulation. *Periodica Polytechnica, Mechanical Engineering*. 2022. 1 (66), pp. 51–58.

13. Kupchuk I., Kolisnyk M., Shtuts A., Paladii M. Development of the technological process of forming rings from sheet samples by stamping rollers and rotary hood. *Bulletin of the Transilvania University of Braşov. Series I: Engineering Sciences*. 2021. 14 (63). 2, pp. 1-13.

Mikhalevich V., Matviychuk V., Kolisnyk M. Assessment of the deformation of the billet material in the direct expression by the roll stamping method

The article presents the results of the development and research of the technological scheme of direct extrusion by the method of stamping by rolling with a conical roll for obtaining complex profile blanks. Since the technological possibilities depend on the deformability of the material, the stress-strain state of the workpieces was analyzed using the mesh method, hardness measurement, and microstructural analysis. The main result of the analysis was the construction of the paths of deformation of the parts of the material of the workpieces in the coordinates "intensity of deformations - an indicator of the stressed state". Zones of workpieces that are deformed under the conditions of a "hard" stress state have been identified, so it is precisely for these zones that an assessment of the deformability of metals has been carried out. To assess the deformability of the material of the workpieces, a damage accumulation model was built based on V.A. Ogorodnikov's criteria and a certain technique for constructing the approximation of the limit deformation curve. From the results of the study of the deformability of the workpiece material, it follows that, compared to the linear principle of accumulation of damage, the calculation based on the model based on V.A. Ogorodnikov's criteria reduces the calculated value of the ultimate deformation. At the same time, setting the non-linearity parameter of damage accumulation to values $n>1$ *that satisfy the condition leads to an increase in the calculated value of the limit strain compared to the linear principle of damage accumulation.*

Key words: *complex profile workpiece, rolling stamping, conical roll, direct extrusion, stress-strain state, deformability.*

Михалевич В. М., Матвийчук В. А., Колиснык Н. А. Оценка деформируемости материала заготовок при прямом выдавливании методом штамповки обкаткой.

В статье приведены результаты разработки и исследования технологической схемы прямого выдавливания методом штамповки обкаткой коническим валком для получения сложнопрофильных заготовок. Поскольку технологические возможности при этом зависят от деформируемости материала, проведен анализ напряженно-деформированного состояния заготовок с использованием метода сеток, измерения твердости и микроструктурного анализа. Главным результатом анализа стало построение путей деформирования частиц материала заготовок в координатах «интенсивность деформаций – показатель напряженного состояния». Установлены зоны деформируемых заготовок в условиях «жесткого» напряженного состояния, поэтому именно для этих зон проведена оценка деформируемости металлов. Для оценки деформируемости материала заготовок построили модель накопления повреждений, основанную на критерии В.А. Огородникова и определенной методики построения аппроксимации кривой предельных деформаций. Из результатов исследования деформируемости материала заготовок следует, что по сравнению с линейным принципом накопления повреждений расчет по модели, базирующейся на критерии В.А. Огородникова снижает расчетное значение предельной деформации. В то же время назначение параметра нелинейности накопления повреждений удовлетворяющих $n>1$ *условию значений приводит к повышению расчетного значения предельной деформации по сравнению с линейным принципом накопления повреждений.*

Ключевые слова*: сложно профилированная заготовка, штамповка обкаткой, конический валок, прямое выдавливание, напряженно-деформированное состояние, деформируемость.*

Михалевич Володимир Маркусович – д-р техн наук, професор ВНАУ
Михалевич Владимир Маркусович – д-р техн- наук, профессор ВНАУ.
Mikhalevich Volodymyr – Doctor of Technical Sciences, Full Professor VNAU.
E-mail: mykhalevych@vntu.edu.ua
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1557-7331

Матвійчук Віктор Андрійович – д-р техн. наук, професор, зав. кафедрою ВНАУ
Матвийчук Виктор Андреевич – д-р техн- наук, профессор, зав. кафедрой ВНАУ.
Matviychuk Viktor – Dr Sc, Full Professor, Head of the Department VNAU.
E-mail: vamatv50@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7837-5174

Колісник Микола Анатолійович – асистент ВНАУ
Колиснык Николай Анатольевич – ассистент ВНАУ
Kolisnyk Mykola – Assistant Professor, Department of Electric Power Engineering, VNAU.
Email: kolisnik30@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5502-6556

ВНАУ – Вінницький національн аграрний університет, м. Вінниця
ВНАУ – Винницкий национальный аграрный университет, г. Винница
VNAU – Vinnitsa National Agrarian University, Vinnitsa

Стаття надійшла до редакції 25.05.22 р.

УДК 339.374+621.044.4 DOI: 10.37142/2076-2151/2022-1(51)98

Тараненко М. Є.
Нарижний О. Г.

КЕРУВАННЯ ПАРАМЕТРАМИ ЕГ-НАВАНТАЖЕННЯ ДЛЯ ШТАМПУВАННЯ ЛИСТОВИХ ДЕТАЛЕЙ З МІНІМАЛЬНИМ ЖОЛОБЛЕННЯМ

Розглянуто механізм розподілу остаточних напружень, що виникають при деформуванні листової заготівки. Моделювання процесу ЕГ-штампування проводиться для умов послідовного локального формоутворення великогабаритних деталей. Такий процес здійснюється в багатоконтурних ЕГ-пресах з багатоелектродними розрядними блоками. В цих типах пресів реалізується можливість керування навантаженням у просторі та часі. Керування здійснюється шляхом зміни місця та часу зміщення розрядів відносно один одного.

Дослідження проводилися з використанням методів численного моделювання із застосуванням програмного продукту LS-DYNA разом з методом ALE. Моделювання проводилося в тривимірної постановці з оригінальними граничними умовами.

Відзначається, що у процесі деформування заготівки трьома ЕГ-розрядами, головні деформації у точках верхньої, серединної та нижньої поверхонь заготовки значно відрізняються за величиною та місцем розташування відносно епіцентрів навантаження.

Показано, що для зниження рівня залишкових напружень, що призводять до жолоблення деталей, порожнину деталей слід формоутворювати з меншою інтенсивністю навантаження, але з більшою кількістю циклів навантаження.

Отримані результати показують, що процес деформування листової заготовки, що навантажується імпульсним силовим полем, носить переважно коливальний характер внаслідок проходження поздовжніх і поперечних хвиль деформацій

Моделювання з малим шагом за часом (~10^{-8} с) показало, що деформування є складним нелінійним процесом та супроводжується коливаннями напружень з різними періодами. Для оптимізації процесу штампування необхідно узгоджувати поведінку заготовки з частотою навантаження.

***Ключові слова**: штампування, листові деталі, імпульсне навантаження, моделювання, напруження, деформації, жолоблення.*

ВВЕДЕННЯ

У останні десятиріччя для виготовлення великогабаритних листових деталей почали використовувати двофазні деформаційно-зміцнювані сталі. Вони мають ряд позитивних властивостей, але до їх недоліків слід віднести високий ступінь післяштампувального жолоблення деталей, що визначається низькою швидкістю релаксації остаточних напружень.

Відомі то широко використовувані методи зниження жолоблення, тобто збереження заданої форми та розмірів, базуються на впливі на відштамповану деталь шляхами:

– термічному та силовому;

– ультразвуковому, електромагнітному.

Ці методи дають позитивний результат, але технологічно їх використання для виготовлення великогабаритних листових деталей доволі складне.

Загалом з цим, у низці праць [15] показано, що на деяких режимах імпульсного навантаження та деформації листових заготовок виникає інтенсивна релаксація залишкових напружень (деформацій); при цьому пластичні властивості деформованого матеріалу збільшуються.

У деяких останніх працях з фізики пластичної течії металів [6–8] робиться висновок про суто коливальний характер зародження та розповсюдження пластичних деформацій та параметри цього процесу залежать від швидкостей деформацій. Стверджується, що при резонансі вимушуваних та власних коливань збільшується пластичність, знижується спротив пластичній деформації та збільшується ступінь релаксації остаточних напружень.

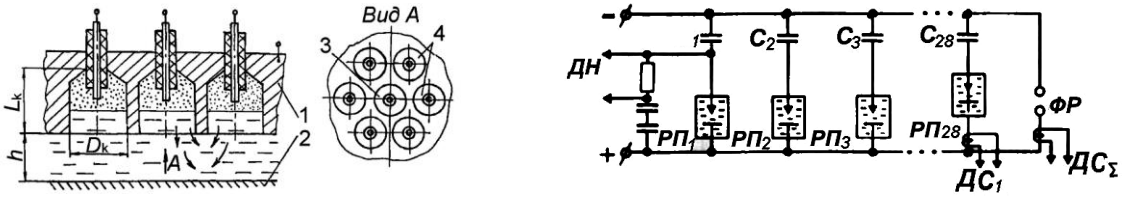
Залишаються незрозумілими два питання – про значення параметрів власних коливань пластичної течії для різних матеріалів та можливості створення у тілі заготовки змушуючих коливань під дією прикладаного імпульсного навантаження.

Метою дослідження є зниження ступеня жолоблення відштампованих великогабаритних листових деталей шляхом керування параметрами навантаження при багатоімпульсному електрогідравлічному штампуванні.

Вирішувані задачі – дослідити напружено-деформований стан (НДС) заготовки, що навантажується електрогідравлічними (ЕГ) розрядами у багатопорожневій розрядній камері, та визначити можливість керування параметрами навантаження.

Методи дослідження. Метод комп'ютерного моделювання у тривимірному просторі з урахуванням деформування заготовки у гетерогенному робочому об'ємі. Для оцінки адекватності використаної моделі були залучені раніш отримані експериментальні результати авторів та інших відомих праць.

Технічні схеми, що використовуються. Для концентрації енергії, що виділяється над заданими ділянками заготовки, більш простого керування енергопотоками в просторі та скорочення втрат енергії була запропонована схема багатокамерного розрядного блоку (БРБ) (рис. 1, *а*) [9].



а б

Рис. 1. Принципові схеми:

а – БРБ: 1 – розрядна камера; 2 – предмет обробки; 3 – розрядна порожнина (РП), у якій здійснюється основний розряд; 4 – шість камер, у яких здійснюються додаткові розряди; точками позначено зону парогазової порожнини (ПГП); *б* – електрична схема комутації генератора імпульсів струму (ГІС); С – батарея конденсаторів; ФР – формуючий розрядник; РП – робочий проміжок; ДС – датчик струму; ДН – датчик напруги

Такий розрядний блок є товстою плитою, в якій виконані розрядні порожнини (камери 3 і 4). Кожна така порожнина оточена аналогічними порожнинами, що розташовані на мінімальній відстані одна від однієї. По осі порожнини встановлені робочі електроди таким чином, що розряди відбуваються між центральним стрижнем електрода та стінкою порожнини. Кожна така електродна пара підключається до окремого контуру ГІС (рис. 1, *б*). До складу контуру включено конденсаторну батарею, що складається з 28 окремих контурів . Паралельно контурам включений формуючий розрядник (ФР), при замиканні якого відбувається подача високої напруги одночасно на всі робочі електроди та виникають власне самі розряди.

У такій схемі можливо реалізовувати зсув за часом початку розрядів у сусідніх РП шляхом зміни міжелектродного проміжку.

Умови моделювання. Процеси імпульсного навантаження заготовки у багатоелектродних розрядних блоках суттєво відрізняються від відомих умов, описаних у низці праць [10–15]. Загальноприйнятним є використання програмного продукту LS DYNA з допомогою методу ALE. У вказаних вище працях використовується модель такої течії при одиночному ЕГ розряді у розрядній камері відносно великого об'єму, у якій розширення парогазового пухиря на початкових етапах його розвитку не обмежується жорсткими стінками розрядної камери. Це призводить до того, що заготовка навантажується інтенсивною ударною хвилею та гідропотоками з відносно малими швидкостями. Це викликано тим, що розширення ПГП на перших етапах (у період інтенсивної передачі енергії до охоплюючої рідини) направлено вісесиметрично (вісі каналу розряду) однакові в усі сторони. Це призводить до втрат енергії.

У більшій частині вказаних праць заготовка вважається нерухомою або деформованою вісесиметрично відносно центральної вісі.

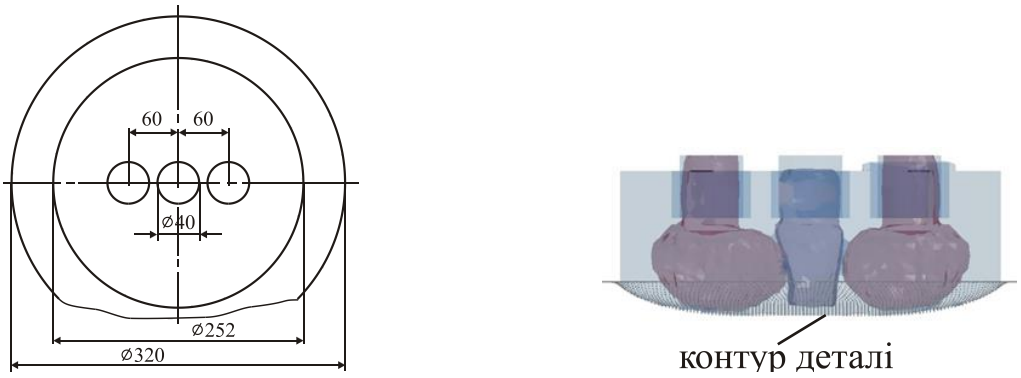
У разі багатоімпульсного навантаження ці умови неприйнятні. В даній роботі були прийняті інші умови.

Прийняті у даній праці умови моделювання представлені у [16–17]. Відносне розташування деяких границь у модельованій системі показано на рис. 2. Заготовка, що деформується, діаметром 320 мм встановлена на матрицю з отвором діаметром 252 мм.

Фланець заготовки притиснутий до матриці таким чином, що виключається його витягування до порожнини матриці.

Розглядається процес деформування заготовки товщиною 1,0 мм з алюмінієвого сплаву з механічними параметрами: початкове значення межі плинності 100 МПа, густина 2100 кг/м^3, модуль пружності 70 ГПа, коефіцієнт Пуассона 0,33. Для заготовки прийнятий закон зміцнення у вигляді $\sigma_T = Ae^n$, де A = 604.9 МПа та n = 0.275.

Вивчаються параметри деформування на трьох поверхнях заготовки: верхній (що є прилеглою до рідини), серединній та нижній (що є прилеглою до матриці).

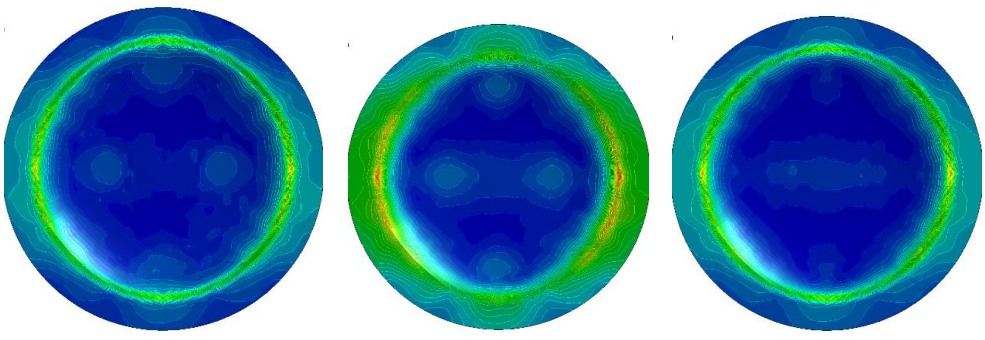


а б

Рис. 2. Схема розташування заготовки, що деформується, (∅ 320 mm) на матриці та трьох розрядних порожнин (а); кадр 2.7 мс послідовного деформування заготовки під дією трьох ЕГ розрядів (б). Зсув у часі бокових розрядів 0,3 мс відносно центрального розряду. Дистанція розрядів до заготовки 40 мм. Енергія в кожному розряді складає 9.75 кДж

РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ

На рис. 3 показано розподіл остаточних пластичних деформацій. Видно, що центральна частина заготовки піддана мінімальній деформації. Максимальна деформація спостерігається в районі перетяжних ребр матриці на діаметрі знаходження зони навантаження. Непереміщуваний фланець матриці також підданий пластичній деформації зі значеннями: на верхній поверхні $(2{,}02\ldots2{,}56)\cdot10^{-2}$, серединній поверхні $(1{,}79\ldots1{,}9)\cdot10^{-2}$ та нижній поверхні $(2{,}4\ldots2{,}6)\cdot10^{-2}$. Тобто пластична деформація зовнішніх поверхонь більше ніж на серединній поверхні.



а б в

Рис. 3. Розподіл остаточних пластичних деформацій на поверхнях заготовки у момент часу 2.7 мс: а – нижня поверхня (max ε = 0.076, min ε = 0.05); б – середня поверхня (max ε = 0.040, min ε = 0.003); в – верхня поверхня (max ε = 0.082, min ε = 0.001)

На рис. 4 приведена кінетика розвитку пластичних деформацій на різних поверхнях заготовки. Максимальні значення деформацій спостерігаються на нижній поверхні заготовки, а її швидкість зміни досягає значень 32,7 с$^{-1}$. Швидкості деформацій на інших поверхнях значно нижчі.

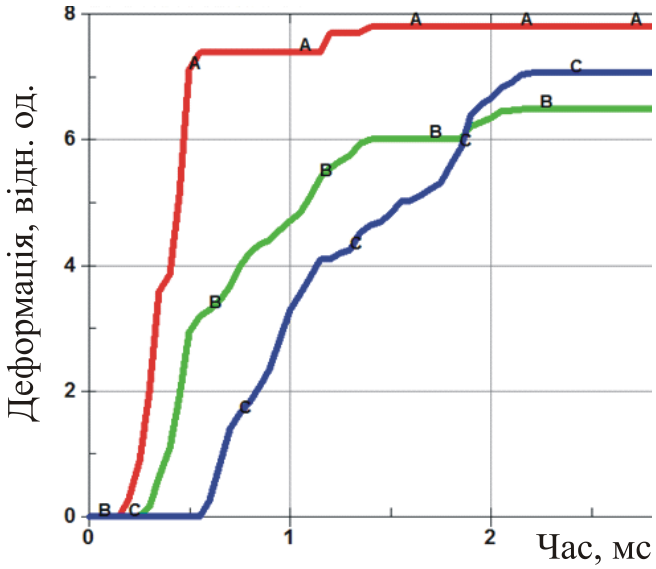


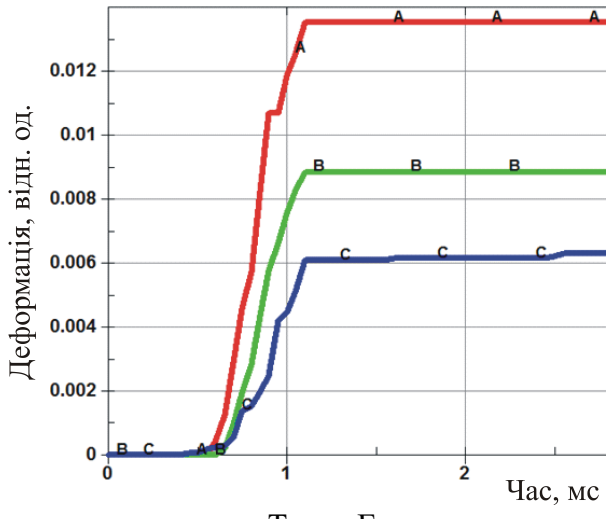
Рис. 4. Залежність величини пластичних деформацій від часу для центральної точки заготовки D (див. рис. 6):

A – нижня поверхня, B – серединна поверхня, C – верхня поверхня

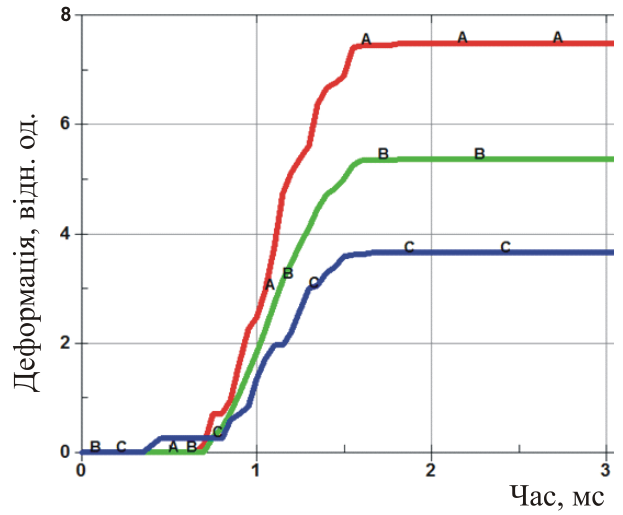
Всі залежності мають неспадаючий характер. Це фізично цілком пояснювано для центральної точки штампованої круглої заготовки. На кінцевій стадії розрахунку спостерігається плато, що пояснюється завершенням пластичного деформування. Слід відзначити різницю затримки початку та кінця пластичних деформацій для різних поверхонь заготовки. Це, мабуть, викликано впливом згину – деформація плине з різними швидкостями. Величина деформації на верхній поверхні до моменту 1,9 мс нижче деформацій на серединній поверхні, а потім співвідношення значень змінюється.

На рис. 5 показана кінетика розвитку головних максимальних напружень в центрі заготовки на трьох поверхнях.

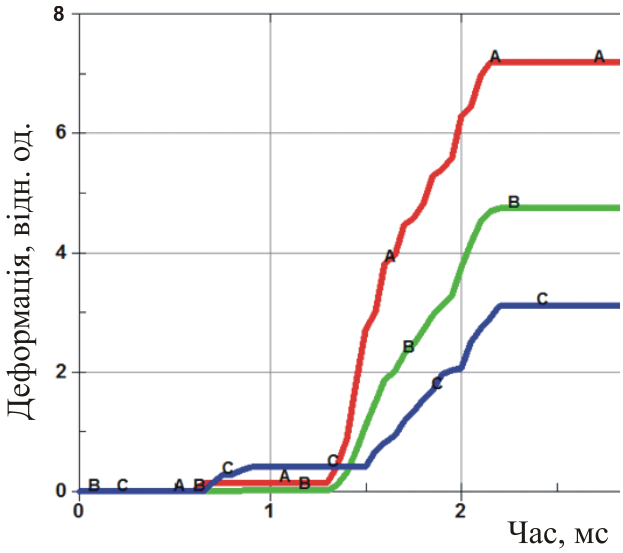
Пластичні деформації зароджуються у центрі заготовки, у місці появи початкового збурення, та розповсюджуються від нижньої поверхні до верхньої на протязі ~0,5 мс, накопичуюся послідовно з різною швидкістю до максимальних значень. Далі з'являється плато. Рівні плато мають різні значення величини пластичної деформації. Різниця у рівнях плато для різних точок заготовки є різною. Мінімальне значення різниці у рівнях спостерігається у центральній точці (D, рис. 4), а максимальне – у точках інтенсивного навантаження (E та F, рис. 4). По мірі віддалення від цієї зони різниця у величинах накопленої пластичної деформації зменшується (точка GG).



а, Точка E



б, Точка F



в, Точка G

Рис. 5. Залежності накоплення пластичних деформацій для різних точок заготовки від часу: A – нижня поверхня, B – серединна поверхня, C – верхня поверхня

Розташування точок показано на рис. 6

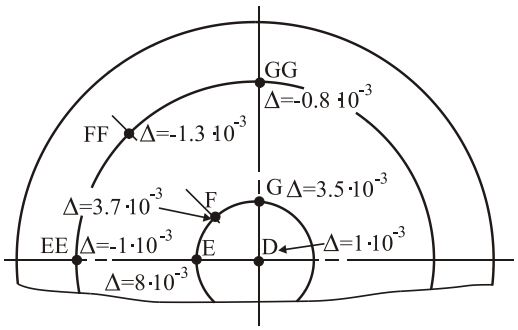


Рис. 6. Характер розповсюдження різниці накоплених пластичних деформацій на випуклій та увігнутій поверхнях заготовки при штампуванні трьома ЕГ розрядами (два бокових розряди зсунуті за часом відносно центрального на 300 мкс). Діаметр заготовки 320 мм, діаметр отвору у матриці 252 мм. Товщина заготовки 1,0 мм, матеріал – алюмінієвий сплав. Δ – різниця у рівнях плато (див. рис. 5). Знак (–) означає перевищення пластичних деформацій на увігнутій поверхні заготовки

На рис. 7 показано кінетику розвитку максимальних головних напружень у центрі заготовки на трьох поверхнях.

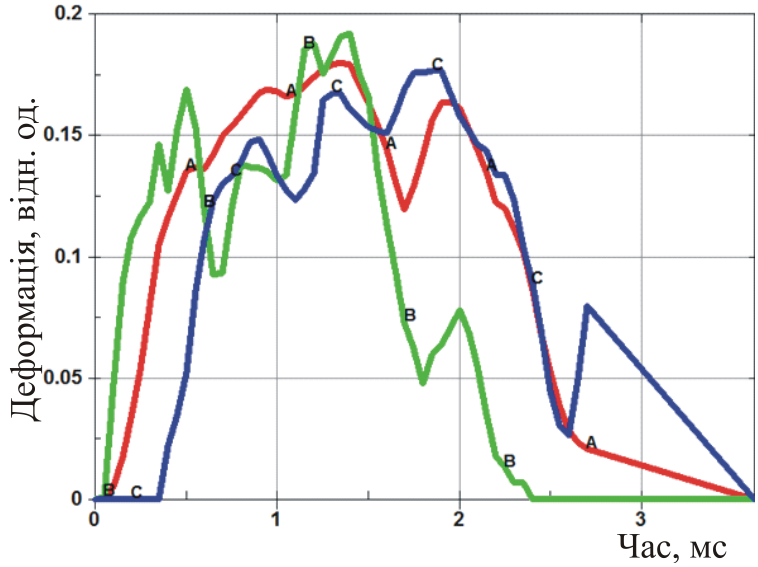


Рис. 7. Залежність розвитку максимальних головних напружень від часу у центрі заготовки на трьох поверхнях:

А – серединна поверхня, В – нижня поверхня, С – верхня поверхня

Якщо припустити, що ця різниця характеризує рівень остаточних пружних напружень, то можна вважати, що рівень остаточних пружних напружень, що призводить до жолоблення, є меншим у зонах з меншою інтенсивністю навантаження.

Загальний характер усіх залежностей – ріст до максимальних значень и падіння до нуля. Але всі залежності носять коливальний характер з різними періодами коливань.

Швидкість росту напружень на початковій ділянці приблизно однакова, але швидкість їх падіння різна. У діапазоні часу процесу 0,5…2,0 мс спостерігаються інтенсивні коливання величин головних напружень на усіх поверхнях. Але найбільше значення головних максимальних напружень реалізується на нижній поверхні заготовки.

На рис. 8 приведена кінетику розвитку максимальних напружень зсуву у центрі заготовки на трьох поверхнях. Слід відзначити затримання розвитку напружень на рис. 5, 6, що пояснюється скінченністю швидкості розповсюдження хвиль тиску у рідині. Самі залежності напружень від часу носять нелінійний коливальний характер. Це можна пояснити складним характером взаємодії коливального навантаження та хвильовим характером розповсюдження збурень в матеріалі заготовки. Явно виражені періоди коливань 115…120 мкс та 460…500 мкс, що є свідоцтвом про додавання, як мінімум, двох коливальних процесів.

Для оцінки можливостей керування деформаційними параметрами був промодельований процес навантаження одиночним розрядом, що проводиться у центрі заготовки.

Залежність інтенсивності пластичних деформацій від часу приведена на рис. 8. Раготовка розглядається як єдине ціле.

У цьому розрахунковому варіанті було змінено тривалість виділення енергії 16 мкс (зменшено у два рази у порівнянні з основним варіантом), а енергія збільшена у два рази. Для т. А, що знаходиться у центрі заготовки, помітно зростання величини пластичної деформації у порівнянні з базовим варіантом (виділена енергія 9,75 кДж та тривалість виділення 32 мкс) та швидкості пластичної деформації. Для т. А вона дорівнює 1400 $с^{-1}$, для точки на відстані 27 мм всього 1,4 $с^{-1}$.

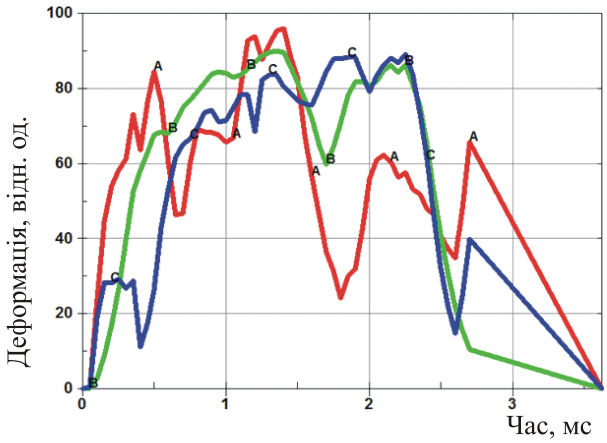


Рис. 8. Залежність розвитку максимальних напружень зсуву від часу у центрі заготовки на трьох поверхнях: А – нижня поверхня, В – серединна поверхня, С – верхня поверхня

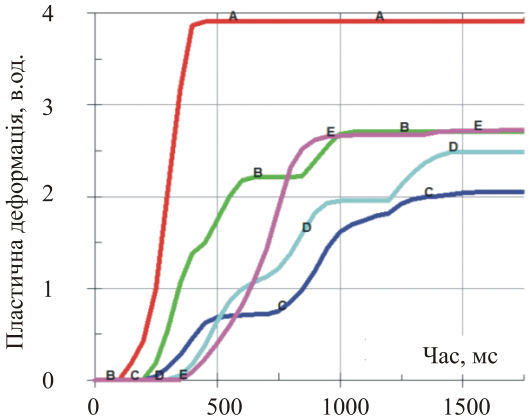


Рис. 9. Залежність інтенсивності пластичних деформацій від часу (для відповідних точок заготовки при подвоєній розвинутій потужності. Час виділення енергії 16 мкс. Крок точок ~ 27 мм

На основі таких порівнянь за серією варіантів навантаження був зроблений висновок про можливість реалізації широкого діапазону деформаційних параметрів шляхом керування кількістю та швидкістю виділення енергії, зміни режиму розряду (аперіодичний чи коливальний) та геометричних параметрів зони навантаження. Керування переліченими параметрами технічно просто на багатоконтурних ЕГ-пресах.

ПЕРСПЕКТИВИ СТВОРЕННЯ ТЕХПРОЦЕСІВ ШТАМПУВАННЯ З МІНІМАЛЬНИМ ЖОЛОБЛЕННЯМ ДЕТАЛЕЙ

У вказаних вище працях [2–6] експериментально показано можливість отримання різнотипних деталей з дуже малим ступенем жолоблення після формоутворення. Але в них не приведено характеристики деформування як функції часу, а лише стверджується факт зниження остаточних напружень. У працях Г. А. Гулого [1] та Кривицького Є. В. [18] задекларовано зниження остаточних напружень після ЕГ-обробки листових деталей. У них також не відзначено режими обробки, при яких ефект релаксації остаточних напружень (або їх виникнення на мінімальному рівні) помічається найбільш яскраво.

У фундаментальній праці Дж. Ф. Белла [19] експериментально доведена немонотонна залежність радіальних напружень σ_r, що виникають при торцьовому ударі жорсткого стержня об інший (м'який). При цьому спостерігаються практично симетричні коливання σ_r коло теоретичного значення зі середнім періодом 11,6 мкс та амплітудою (0.1…0.25) σ_r для алюмінієвих зразків. Для зразків з полікристалічної міді період дорівнював 5…6 мкс, а амплітуда – $0.56\sigma_r$. Значення кінцевих відносних деформацій дорівнювали 1,5…2,0%, рідше до 3 %.

У працях Дж. Ф. Белла не досліджувались повторні навантаження та, більш того, у режимі резонансу. Проте, це перші експериментальні дані про параметри коливального процесу, що виникає при ударному навантаженні. У низці праць Л.Б. Зуєва, зокрема [7], теоретично та експериментально обґрунтовано механізм передачі пластичної деформації завдяки автохвилям локалізованої пластичної течії. Часові та геометричні масштаби цього явища складають $10^2…10^3$ с та 10^{-2} м. Але ці значення отримані при постійному навантаженні та у великому ступені залежать від режиму деформування.

У праці В.П. Северденко [4] показано, що накладення вібрації визначеного діапазону на процес статичного штампування знижує спротив деформуванню та рівень остаточних напружень. Такий діапазон частот для деяких штампувальних матеріалів визначено у районі 16 кГц або періоді коливань ~40 мкс.

Є. В. Кузнецовим [8] визначено ширину полоси частот, у яких найбільш помітно проявляється дія резонансного вібропластичного ефекту. При цьому ефекті знижується спротив деформуванню, знижуються остаточні напруження у матеріалі, що деформується, і, як слідство, малий ступінь післяопераційного жолоблення деталі. Більш яскраво резонансний вібропластичний ефект, за словами автора, при відношенні частот навантаження та власної частоти зсувно-релаксаційного процесу, що дорівнює одиниці. Ширина сприятливої зони полоси частот залежить від рівня навантажувальних зусиль (напружень у деталі, швидкості деформування та часу). Власна частота зсувно-релаксаційних процесів автором визначена у діапазоні: алюміній AD1 – 157,08 рад/с, сталь 12Х18Н9Т – 44,88 рад/с. Залежності полоси частот від швидкості деформування у праці не приведено.

В.М. Косенковим у працях [20, 21] показано результати експериментального дослідження залежності періоду релаксації остаточних напружень (величина зворотна відповідній частоті) від швидкості деформації. Але приведені чисельні значення періоду релаксації для подібних металів значно відрізняються – від одиниць до сотень мкс.

Загальним для розглянутого складу праць є наступне:

– при вібропластичному навантаженні відповідної інтенсивності заготовки, що деформується, помітно зниження спротиву пластичному деформуванню та зменшення рівня остаточних напружень;

– існує діапазон значень періодів вібропластичного навантаження, у якому більш яскраво проявляються його позитивні наслідки. Межі цього діапазону для різних металів визначаються від декількох мкс до 200…300 мкс;

– діапазон швидкостей пластичних деформацій, у якому проявляється ефект вібропластичності, можна визначити як 0…1500 $с^{-1}$;

– при листовому формозміненні необхідно прагнути до реалізації більших значень напружень деформування.

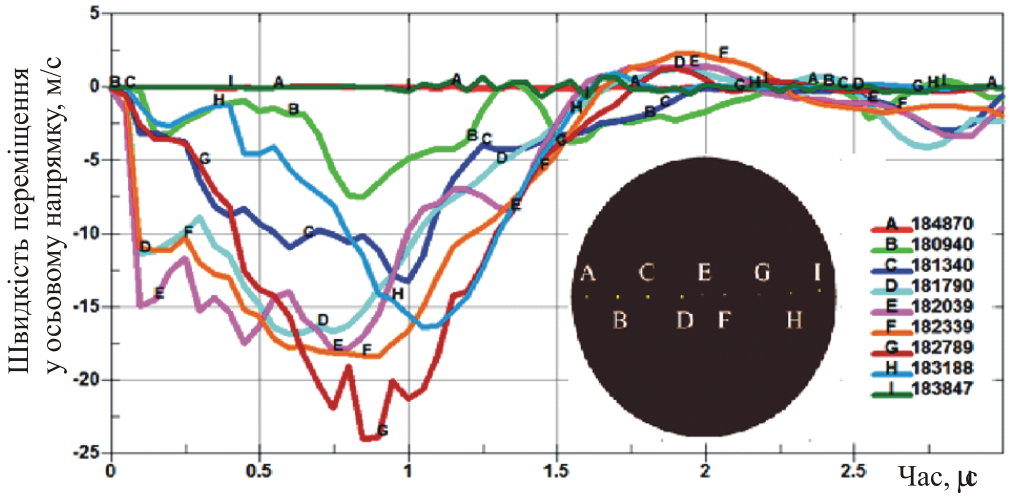
Виходячи з цих висновків стане ясним, що для зниження ступеня жолоблення необхідно створювати у штампованій заготовці умови для реалізації коливального процесу з визначеними частотами та інтенсивністю. Таке навантаження слід проводити у ЕГ-установках багатоелектродних конструкцій. Частота, що генерує автоколивання, за попередньою оцінкою повинна знаходитися у діапазоні 16 ± 100 % для більшості штампованих матеріалів. У теперішній час для конкретних матеріалів слід звужувати полосу необхідних частот дослідним шляхом.

Керування частотою вібронавантаження у багатоконтурних ЕГ-установках можливо кількома методами:

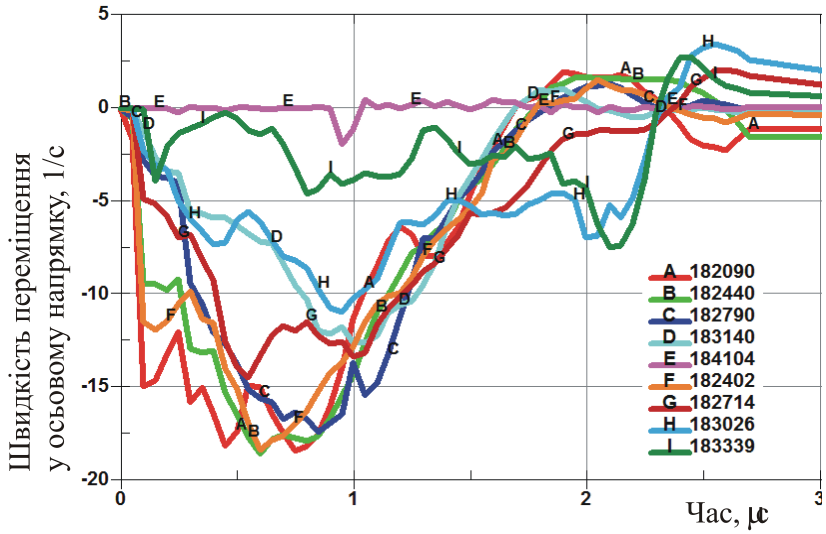
– керування тривалістю виділення енергії шляхом зміни ємності, індуктивності розрядного контуру та величини міжелектродного проміжку;

– зміщенням за часом початку керувальних розрядів відносно основного.

Для прикладу на рис. 10 показано залежності швидкостей переміщення окремих точок заготовки від часу при різних кількостях виділеної енергії. Як видно, помітно змінюється система коливальних процесів у заготовці. Але при цьому трапляється коливальне зміщення поверхні заготовки (див. рис. 2 та 3).



а



б

Рис. 10. Залежності переміщень контрольних точок заготовки від часу:
а – виділення 100% енергії у кожній порожнині; б – виділення 50% енергії у кожній боковій порожнині, 300 μs

При відносно невеликій та короткій зміні виділеної енергії, як показують чисельні експерименти, суттєвим образом змінюються пластичні деформації та їх швидкості.

Керування місцем підключення окремих груп електродів до генератора імпульсів току можна створювати прийнятні умови деформування на окремих ділянках заготовки, таким чином забезпечувати отримання всієї деталі с заданими технічними вимогами.

ВИСНОВКИ

1. Показана можливість управління параметрами деформування заготовки на багатоелектродних ЕГ-пресах для отримання мінімального жолоблення великогабаритних листових деталей. Призначення керувальних параметрів для створення вібро-релаксаційного режиму деформування технічно нескладно.

2. Розроблена математична модель процесів виникнення та розповсюдження пластичних деформацій у листовій заготовці під дією багатоімпульсного навантаження демонструє нестаціонарний коливальний характер цих процесів, у яких спостерігаються поздовжні та поперечні хвилі. Параметрами цих коливань (амплітудою та періодами) можна керувати. Шляхом підбору режиму виділення енергії (параметрів багатоімпульсного навантаження, потужності та місця виділення енергії) можна забезпечити оптимальну швидкість деформації та розподіл деформацій для отримання якісних деталей.

3. Для виключення необхідності дослідного відпрацювання техпроцесів штампування без значного ступеню жолоблення необхідно знання динамічних властивостей деформування використовуваних матеріалів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Гулый Г.А. Научные основы разрядно-импульсных технологий. Киев : Наукова думка. 1990. 208 с.

2. Старков Н. В., Стрелковская Л. И. Экспериментальное исследование импульсной электрогидравлической калибровки листовых деталей из высокопрочной стали. Вісник НТУ «ХПІ». *Сер. Техніка та електрофізика високих напруг*. Харків : НТУ «ХПІ». № 35 (1260). 2017. С. 79–83.

3. Мериин Б. В., Корнет И. Ф., Савулькин Д. Е. Эффективность электрогидравлической правки нежестких деталей при разных условиях нагружения. *Кузнечно-штамповочное производство*. 1990. № 10. С. 13–15.

4. Северденко В.П., Пащенко В.С., Кособуцкий В.С. Листовая штамповка с ультразвуком. Минск : Наука и техника. 1975. 192 с.

5. Тараненко М.Е. Метод снижения коробления листоштампованных деталей. Сб. науч. трудов *Обработка материалов давлением*. Краматорск : ДГМА. 2018. №1 (46). С. 100–104.

6. Дідик Р. П., Кузнецов Є. В., Забара В. М. Фізичні основи міцності: Підручник. Дніпропетровськ : Наука та освіта. 2005. 608 с.

7. Зуев Л.Б. Автоволновая пластичность. Локализация и коллективные моды. Москва : Физматлит. 2018. 202 с.

8. Кузнецов Е.В. Условия возникновения в металлах вибропластического резонанса. *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением*. 2002. №2. С. 6–9.

9. Тараненко М.Е. Електрогидравлическая штамповка: теория, оборудования и технологические процессы (монография). Харьков : Нац. аэрокосм. ун-т. 2011. 272 с.

10. Mamutov Alexander V., Golovashchenko Sergey F., Bessonov Nicolas M., Mamutov Viacheslav S. Electrohydraulic Forming of Low Volume and Prototype Parts: Process Design and Practical Examples. *J. Manuf. Mater. Process*. 2021. 5. 47. 20 p., DOI: https://doi.org/10.3390/jmmp5020047.

11. Woo Mina, Lee Kyunghoon, Song Woojin, Kang Beomsoo, Kim Jeong. Numerical Estimation of Material Properties in the Electrohydraulic Forming Process Based on a Kriging Surrogate Model. *Mathematical Problems in Engineering*. Hindawi. Vol. 2020, Article ID 3219829. 12 p. DOI: https://doi.org/10.1155/2020/3219829.

12. Woo Mina, Kim Jeong. Inverse parameter estimation to predict material parameters of the Cowper–Symonds constitutive equation in electrohydraulic forming process. *J Eng Math*. 132:8. 22 p. DOI: https://doi.org/10.1007/s10665-021-10175-7.

13. Dariani B.M., Liaghat G.H., Gerdooei M. Experimental investigation of sheet metal formability under various strain rates. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. J. Eng. Manuf*. 2009. 223. pp. 703–712, DOI: http://journals.sagepub.com/doi/10.1243/09544054JEM1430.

14. Mamutov V., Mamutov A., Golovaschenko S. Simulation of High-Voltage Discharge Channel in Water at Electro-Hydraulic Forming Using LS-DYNA. *13 International LS-DYNA users Conference. Metal Forming*. Dearborn. June 8-10. 2014. 9 p. DOI: https://www.dynalook.com/conferences/13th-international-ls-dyna-conference/metal-forming/simulation-of-high-voltage-discharge-channel-in-waterat-electro-hydraulic-forming-using-ls-dyna-r.

15. Mamutov Alexander V., Golovashchenko Sergey F., Mamutov Viacheslav S., Bonnen John J.F. Modeling of electrohydraulic forming of sheet metal parts. *Journal of Materials Processing Technology*. 219 (2015). pp. 84–100. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.11.045.

16. Нарыжный А. Г. Вычислительная модель электрогидравлического эффекта. Сб. науч. тр. *Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии* : Харьков. Нац. аэрокосм ун-т им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт». Вып. 54. 2012. С. 62–67.

17. Нарыжный А. Г., Тараненко М. Е. Механические процессы в системе с погружной электрогидравлической камерой. Эксперименты и моделирование. Сб. науч. тр. *Обработка металлов давлением.* Краматорск. ДГМА. № 2 (49). 2019. С. 136–142. DOI: 10.37142/2076-2151/2019-2(49)136.

18. Кривицкий Е.В. Динамика электровзрыва в жидкости. Киев : Наукова думка. 1986. 206 с.

19. Белл Дж. Ф. Экспериментальные основы механики деформируемых твердых тел. В 2-х частях. Часть I. Малые деформации. Пер с англ. Под ред. А.П. Филина. Москва : Наука. 1984. 600 с. Часть II. Конечные деформации. Пер с англ. Под ред. А.П. Филина. Москва : Наука. 1984. 432 с.

20. Косенков В.М., Бычков В.М. Метод определения реологических и энергетических характеристик ударного сжатия металлов. Новосибирск. *ПМТФ*. 2012. Т. 53. №6. С. 134–143.

21. Косенков В.М. Определение релаксационных и дислокационных характеристик металлов по диаграммам ударного сжатия. Новосибирск. *ПМТФ*. 2014. Т. 55. №4, С. 33–42.

REFERENCES

1. Hulyi G.A. Scientific fundamentals of discharge-impulse technologies. Kyev : Scientific thought. 1990. 208 p. *(in Russian).*

2. Starkov N.V., Strelkovskaya L.I. Experimental researches of impulse electro-hydraulic calibration of sheet articles of high-strength steel. Visnik NTU KhPI *Engineering and Electro-Physics of High Voltage*. Kharkiv : NTU «KhPI», № 35 (1260). 2017. pp. 79–83. *(in Russian).*

3. Meriin B. V. Kornet I. F., Savulkin D. E. Efficiency of electro-hydraulic correction of low-rigidity articles at different loading conditions. *Forging and Stamping Production.* 1990. № 10. pp. 13–15. *(in Russian).*

4. Severdenko V.P., Pachshenko V.S., Kosobutskiy V.S. Sheet forming with ultrasound. Minsk: Science and Engineering. 1975. 192 p. *(in Russian).*

5. Taranenko M.Ye. Method of reduction of warping of sheet-formed articles. *Materials working by pressure*. Kramatorsk. DSEA. 2018. №1 (46). pp. 100–104. *(in Russian).*

6. Didyk R. P., Kuznetsov Ye. V., Zabara V. M. Physical fundamentals of strength: Handbook. Dnipropetrovsk : Science and Education. 2005. 608 p. *(in Ukrainian).*

7. Zuev L.B. Auto-waved plasticity. Localization and collective modes. Moscow : PhysMatLit. 2018. 202 p. *(in Russian)*

8. Kuznetsov Ye. V. Conditions of appearing of vibro-plastic resonance in metals. *Forging and Stamping Production*. *Materials working by pressure*. 2002. №2, pp. 6–9. *(in Russian).*

9. Taranenko M.Ye. Electrohydraulic forming: theory, equipment and technological processes (monography). Khrkov. Nat. Aerosp. Univ. 2011. 272 p. *(in Russian).*

10. Mamutov Alexander V., Golovashchenko Sergey F., Bessonov Nicolas M., Mamutov Viacheslav S. Electrohydraulic Forming of Low Volume and Prototype Parts: Process Design and Practical Examples. *J. Manuf. Mater. Process*. 2021. 5. 47. 20 p., DOI: https://doi.org/10.3390/jmmp5020047.

11. Woo Mina, Lee Kyunghoon, Song Woojin, Kang Beomsoo, Kim Jeong. Numerical Estimation of Material Properties in the Electrohydraulic Forming Process Based on a Kriging Surrogate Model. *Mathematical Problems in Engineering*. Hindawi. Vol. 2020, Article ID 3219829. 12 p. DOI: https://doi.org/10.1155/2020/3219829.

12. Woo Mina, Kim Jeong. Inverse parameter estimation to predict material parameters of the Cowper–Symonds constitutive equation in electrohydraulic forming process. *J Eng Math*. 132:8. 22 p. DOI: https://doi.org/10.1007/s10665-021-10175-7.

13. Dariani B.M., Liaghat G.H., Gerdooei M. Experimental investigation of sheet metal formability under various strain rates. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*. *J. Eng. Manuf*. 2009. 223. pp. 703–712, DOI: http://journals.sagepub.com/doi/10.1243/09544054JEM1430.

14. Mamutov V., Mamutov A., Golovaschenko S. Simulation of High-Voltage Discharge Channel in Water at Electro-Hydraulic Forming Using LS-DYNA. *13 International LS-DYNA users Conference. Metal Forming*. Dearborn. June 8-10. 2014. 9 p. DOI: https://www.dynalook.com/conferences/13th-international-ls-dyna-conference/metal-forming/simulation-of-high-voltage-discharge-channel-in-waterat-electro-hydraulic-forming-using-ls-dyna-r.

15. Mamutov Alexander V., Golovashchenko Sergey F., Mamutov Viacheslav S., Bonnen John J.F. Modeling of electrohydraulic forming of sheet metal parts. *Journal of Materials Processing Technology*. 219 (2015). pp. 84–100. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.11.045.

16. Naryzhnyi O. G. Computational model of electrohydraulic effect. *Open information and computer integrated technologies* : Kharkov. Nat. Aerosp. University "KhAI". Issue. 54. 2012. C. 62–67. *(in Russian).*

17. Naryzhnyi O. G., Taranenko M. Ye. Mechanical processes in the system with immersed electrohydraulic chamber. Experiments and modelling. *Materials working by pressure*, Kramatorsk. DSEA. № 2 (49). 2019. pp. 136–142. DOI: 10.37142/2076-2151/2019-2(49)136. *(in Russian).*

18. Kryvitskiy Ye.V. Dynamics of electro-explosive in liquid. Kiev : Scientific thought. 1986. 206 p. *(in Russian).*

19. Bell J. F. Experimental fundamentals of mechanics of deformable solids. In 2 vol. Vol. I. Low deformations. Translated form English. Edited by A.P. Filin. Moscow : Science. 1984. 600 p. Part II. Finite deformations. Translated form English. Edited by A.P. Filin. Moscow : Science. 1984. 432 p. *(in Russian).*

20. Kosenkov V.M., Bychkov V.M. Method of determination of rheological and energy characteristics of impact compession of metals. Novosibirsk : *PMTF*. 2012. Vol. 53. №6. pp. 134–143. *(in Russian).*

21. Kosenkov V.M. Determination of relaxation and dislocation characteristics of metals by diagrams of impact compression. Novosibirsk : *PMTF*. 2014. Vol. 55. №4, pp. 33–42. *(in Russian).*

Taranenko M., Naryzhnyi O. Controlling parameters of electro-hydraulic loading at forming of sheet articles with minimal warping

Mechanism of distribution of residual stress, which appear at sheet article deformation, is considered. Modelling of electro-hydraulic (EH) forming is conducted for conditions of consequent local changing of shape of large-dimensional articles. This process is conducted in multi-contour electrohydraulic presses with multi-electrode discharge blocks. In presses of this type possibility of loading control in space and time is realized practically. Controlling of process is conducted by means of changing place and time of electrical discharges shifting with respect to each other.

Researches were conducted by means of application of numerical modelling with LS-DANA software and together with ALE method. Modelling was done in 3D-formulation with specific boundary conditions.

It is mentioned that at blank deformation by triple EH-discharges principal strains at points on upper, middle and lower blank surfaces differ by value and place of location with respect to loading epicenters.

It is shown that for reduction level of residual stress which lead to article warping one has to create cavity of an article with less intensive loading but with higher amount of loading cycles.

Results obtained are shown that the process of sheet blank deformation loaded with impulse loading field has mainly oscillative character due to passing longitudinal and lateral waves of deformation.

Modelling with short increment by time (~10^{-8} sec) has revealed that article deformation is complicated non-linear process and is accompanied with stress oscillations having different periods. To optimize forming process it is necessary to adjust blank behavior with loading frequency.

***Key words**: forming, sheet articles, impulse loading, modelling, stress, strain, warping.*

Тараненко М. Е., Нарыжный А. Г. Управление параметрами электрогидравлического нагружения для штамповки листовых деталей с минимальным короблением

Рассмотрен механизм распределения остаточных напряжений, которые возникают при деформировании листовой заготовки. Моделирование процесса ЭГ-штамповки проводится для условий последовательного локального формоизменения крупногабаритных деталей. Такой процесс осуществляется в многоконтурных ЭГ-прессах с многоэлектродными разрядными блоками. В этих типах прессов реализуется возможность управления нагружением в пространстве и времени. Управление осуществляется путем изменения места и времени смещения разрядов относительно друг друга.

Исследования проводились с использованием методов численного моделирования с применением программного продукта LS-DYNA совместно с методом ALE. Моделирование проводилось в трехмерной постановке с оригинальными граничными условиями.

Отмечается, что в процессе деформирования заготовки тремя ЭГ-разрядами, главные деформации в точках верхней, срединной и нижней поверхностей заготовки значительно отличаются по величине и месту расположения относительно эпицентров нагружения.

Показано, что для снижения уровня остаточных напряжений, которые приводят к короблению деталей, полость деталей следует формообразовывать с меньшей интенсивностью нагрузки, но с большим количеством циклов нагружения.

Полученные результаты показывают, что процесс деформирования листовой заготовки, нагружаемой импульсным силовым полем, носит преимущественно колебательный характер вследствие прохождения продольных и поперечных волн деформаций.

Моделирование с малым шагом по времени (~10^{-8} с) показало, что деформирование является сложным нелинейным процессом и сопровождается колебаниями напряжений с разными периодами. Для оптимизации процесса штамповки необходимо согласовывать поведение заготовки с частотой нагружения.

***Ключевые слова**: штамповка, листовые детали, импульсная нагружение, моделирование, напряжение, деформации, коробление.*

Тараненко Михайло Євгенович – д-р техн. наук, проф. НАУ «ХАІ» ім. Н. Є. Жуковского
Taranenko Mykhailo – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Professor of NAU “KhAI”
Тараненко Михаил Евгеньевич – д-р техн. наук, профессор НАУ «ХАИ» им. Н. Е. Жуковского
E-mail: m.taranenko@khai.edu
ORCID: 0000-0003-4126-0979

Нарижний Олександр Георгійович – канд. техн. наук, доц. НАУ «ХАІ» ім. Н. Є. Жуковского
Naryzhnyi Olexandr – Candidate of Technical Science, Associate Professor of NAU “KhAI”
Нарыжный Александр Георгиевич – канд. техн. наук, доцент НАУ «ХАИ» им. Н. Е. Жуковского
E-mail: o.naryzhniy@khai.edu
ORCID: 0000-0002-5379-1964

НАУ «ХАІ» ім. Н. Є. Жуковского – Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут» ім. М. Є. Жуковського, м. Харків
NAU “KhAI” – National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv
НАУ «ХАИ» им. Н. Е. Жуковского – Национальный аэрокосмический университет «Харьковский Авиационный институт»им. Н. Е. Жуковского, г. Харьков

Статья поступила в редакцию 10.05.22 г.

УДК 621.7.043 DOI: 10.37142/2076-2151/2022-1(51)110

Орлюк М. В.
Піманов В. В.

ВИКОРИСТАННЯ ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ DEFORM ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ОПЕРАЦІЙ ЛИСТОВОГО ФОРМУВАННЯ

Використання при розробці технології виготовлення деталей зі складною геометрією з листового матеріалу та проектуванні відповідного штампового оснащення лише практичних рекомендацій з довідникової літератури не гарантує отримання якісних деталей та відсутність браку за результатами штампування, оскільки ці рекомендації не можуть врахувати усі особливості деформування за конкретних умов. У випадку появи під час штампування браку розроблений технологічний процес або існуюче штампове оснащення потребує доопрацювання. Подібна проблема, пов'язана з руйнуванням матеріалу, виникла при штампуванні корпусної деталі великокаліберного кулемету із листової заготовки із сталі 30ХГСА. З ціллю усунення браку в роботі була досліджена ефективність використання програмного комплексу DEFORM для встановлення особливостей листової формовки складних просторових деталей та оптимізації параметрів процесу деформування. Процес деформування досліджувався за допомогою комп'ютерного моделювання з використанням методу скінченних елементів у середовищі DEFORM 3D та перевірки отриманих результатів експериментальним шляхом. Під час моделювання в якості оптимізаційного параметру в роботі використовувались граничні значення критерію руйнування Normalizet Cockcroft-Latham, визначені для операцій вісесиметричного витягування без потоншення. За результатами досліджень були виявлені негативні фактори, що призводили до перенавантаження матеріалу заготовки в процесі деформування та його руйнування. Отримані результати дозволили оптимізувати форму вихідної заготовки та деформуючого інструменту. Оптимізація геометрії деформуючого інструменту та заготовки велась за умови, що за результатами моделювання у найбільш здеформованих ділянках заготовки розраховані значення критерію руйнування Normalizet Cockcroft- Latham не мають перевищувати граничного значення 0,6, визначеного для операції вісесиметричного витягування. Результати натурного експерименту підтвердили правомірність прийнятих припущень. Після внесення відповідних змін у геометрію вихідної заготовки та деформуючого інструменту проблема появи браку під час штампування була успішно вирішена.

Ключові слова: *штампування, оптимізація, формовка, чисельне моделювання, метод скінчених елементів, критерій руйнування.*

При виготовленні деталей із застосуванням операцій листового штампування на жаль виникають ситуації, коли при проектуванні штампового оснащення практичні рекомендації з довідникової літератури [1, 2] не дозволяють врахувати усі особливості процесу деформування листового матеріалу. Дуже часто такі ситуації закінчуються руйнуванням заготовки в процесі деформування, що призводить до необхідності корегування геометрії заготовки та деформуючого інструменту задля усунення браку процесі виготовлення деталей та збереження інструменту як такого.

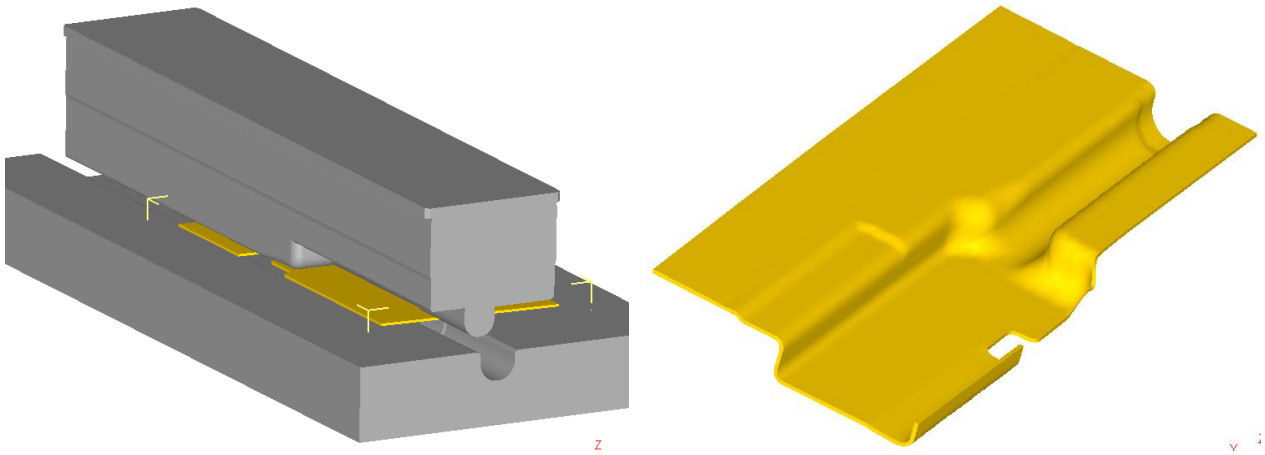
Однак доопрацювання інструменту – це процес ітераційний та витратний. І якщо він виконується без врахування особливостей процесу деформування, то може закінчитись безрезультатним псуванням вартісного штампового оснащення. У таких випадках використання моделювання процесу деформування дозволяє встановити причини руйнування заготовки та визначити необхідну геометрію інструменту, яка б забезпечила деформування вихідної заготовки без руйнування [3–6].

Подібна ситуація виникла при виготовленні зі сталі 30ХГСА корпусної деталі великокаліберного кулемету. У конструкцію даної деталі були закладені мінімально допустимі радіуси переходів, але її формування супроводжувалось постійним руйнуванням заготовки на радіусній кромці деформуючого пуансона (рис. 1). Тому виникла необхідність скорегувати параметри процесу деформування заготовки для усунення браку.

Ціллю роботи є перевірка можливості та ефективності використання комп'ютерного моделювання у середовищі DEFORM для оптимізації параметрів процесу формовки корпусної деталі великокаліберного кулемету із листової заготовки із сталі 30ХГСА для усунення браку штампування.

Рис. 1. Характер руйнування вихідної заготовки при деформуванні

Для встановлення причин руйнування заготовки в процесі деформування в роботі за допомогою комп'ютерного моделювання у програмному комплексі Deform-3D були досліджені особливості формоутворення корпусної деталі за умов, максимально наближених до реальних умов деформування (геометрія деформуючого інструменту, геометрія та матеріал вихідної заготовки, умови тертя). Для моделювання використовувалась пластична модель матеріалу вихідної заготовки. Схема деформування та здеформована заготовка представлені на рис. 2.



а б

Рис. 2. Моделювання деформування заготовки з початковою геометрією:
а – схема деформування; б – здеформований напівфабрикат

Однак програмний комплекс Deform не призначений для моделювання процесів, пов'язаних з руйнуванням матеріалу, тому очікувано за результатами моделювання руйнування заготовки в небезпечному перерізі не відбулось (рис. 3), хоча геометрія деталі, отримана за результатами моделювання процесу формовки (рис. 3) дуже точно повторює геометрію напівфабрикату, отриманого під час натурного експерименту (рис. 1).

Для прогнозування руйнування матеріалу заготовки в процесі деформування в Deform передбачено використання різноманітних критеріїв руйнування [7]. В даній роботі використовувався критерій руйнування Normalizet Cockcroft-Latham, значення якого визначаються за формулою:

$$C = \int_{0}^{\bar{\varepsilon}} \frac{\sigma^{*}}{\bar{\sigma}} d\bar{\varepsilon} ,$$

де $\bar{\varepsilon}$ – накопичена пластична деформація, $d\bar{\varepsilon}$ – приріст накопиченої деформації, σ^* – максимальне головне напруження, $\bar{\sigma}$ – інтенсивність напружень.

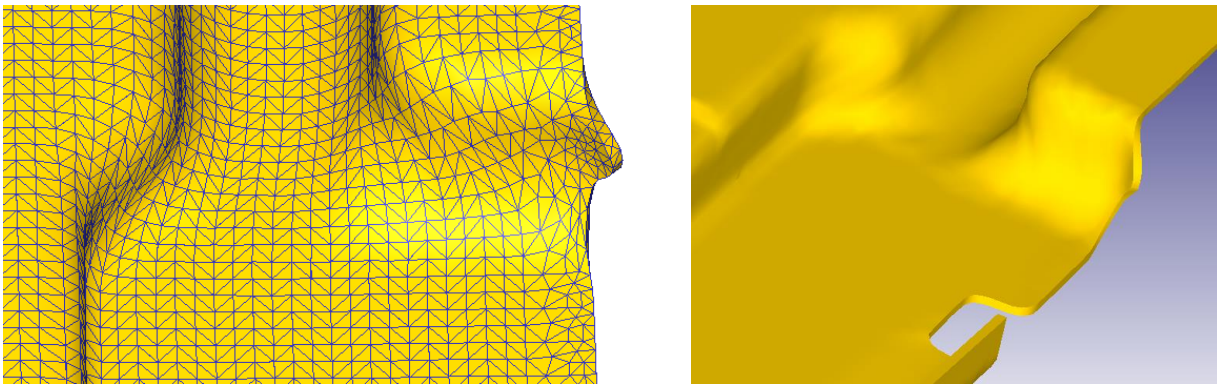
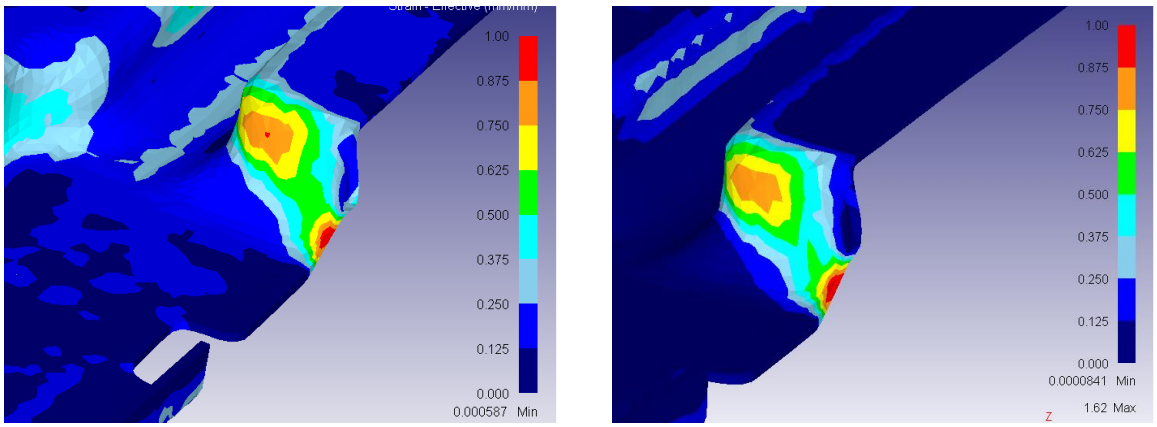


Рис. 3. Характер деформування заготовки в місці руйнування напівфабрикату

Для оцінки ймовірності руйнування було використано граничне значення критерію 0.6, встановлене для сталі 20 [8]. При цьому виходили з припущення, що даний критерій безрозмірний і його що граничне значення для сталі 30ХГСА якщо і буде відрізнятись від прийнятого, то не суттєво, а перевищення розрахованих значень критерію руйнування граничного значення сигналізує про високу ймовірність руйнування заготовки у даному місці в процесі деформування.

На рис. 4 представлені картини розподілу інтенсивності деформацій та значень критерію руйнування на небезпечній ділянці заготовки.



а б

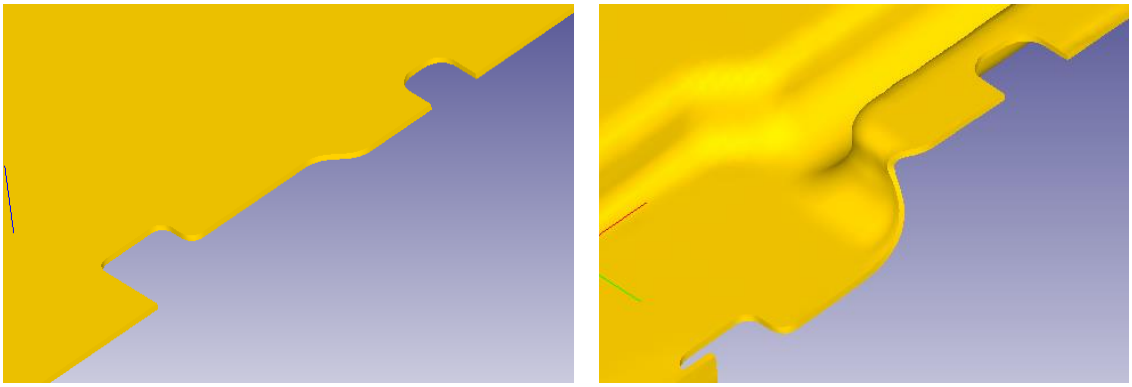
Рис. 4. Розподіл параметрів деформованого стану в здеформованій заготовці з початковою геометрією:

а – інтенсивності деформації ε_i; б – значень критерію руйнування

З рис. 4 видно, що на небезпечній ділянці напівфабрикату існує два місця з піковими значеннями інтенсивності деформації та критерію руйнування, а максимальні значення критерію руйнування 1,6 (значно перевищує прийняте граничне значення 0,6) та інтенсивності деформації $\varepsilon_{i\max}$=1,45 відповідають місцю руйнування заготовки у реальному процесі (рис. 1).

Також за результатами аналізу процесу деформування заготовки було встановлено що початкова форма вихідної заготовки не оптимальна, вона ускладнює процес деформування напівфабрикату та призводить до небажаного збільшення ступеня деформації на небезпечній ділянці.

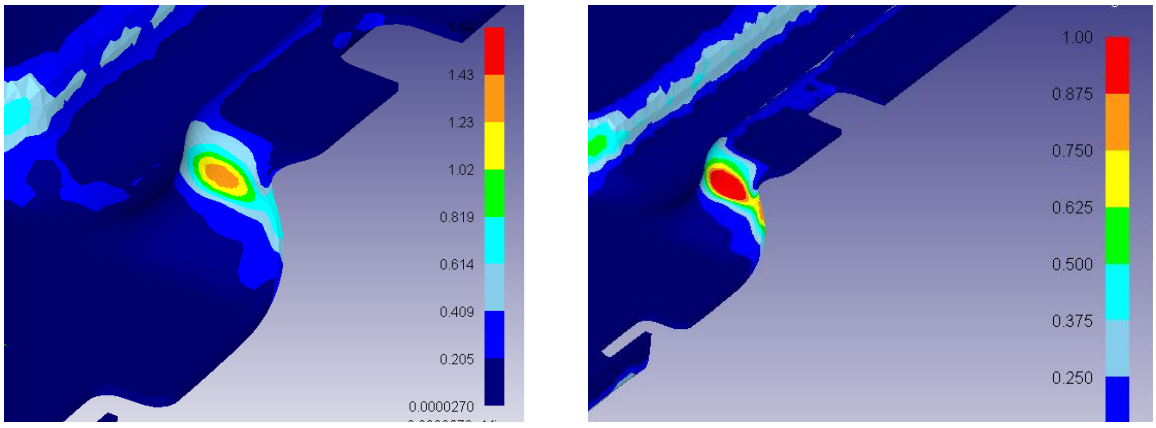
Для покращення умов деформування геометрія вихідної заготовки була скорегована (рис. 5, а) та виконане моделювання процесу формування напівфабрикату із скорегованої заготовки (рис. 5, б).



а б

Рис. 5. Моделювання деформування заготовки зі скорегованою геометрією:
а – елемент контуру заготовки; б – здеформований напівфабрикат

На рис. 6 представлені картини розподілу інтенсивності деформацій та значень критерію руйнування на небезпечній ділянці напівфабрикату при деформуванні скорегованої заготовки.



а б

Рис. 6. Розподіл параметрів деформованого стану в здеформованій заготовці зі скорегованою геометрією:
а – інтенсивності деформації ε_i; б – значень критерію руйнування

Результати моделювання показали, що використання заготовки зі скорегованою геометрією дозволяє розвантажити ділянку напівфабрикату на радіусній кромці пуансона, де відбувалось руйнування заготовки, проте залишилась залишилось небезпечна ділянка на радіусній кромці матриці. Максимальне значення інтенсивності деформації на цій ділянці становить $\varepsilon_{i\max}$ =1,3, критерію руйнування – 1,5, що перевищує прийняте граничне значення 0,6 та свідчить про дуже високу ймовірність руйнування.

Проведений натурний експеримент підтвердив, що використання заготовки із скорегованою геометрією дозволяє уникнути руйнування заготовки на радіусній кромці пуансону, проте руйнування заготовки відбулось на радіусній кромці матриці (рис. 7), де за результатами моделювання значення критерію руйнування перевищили граничне значення.

Оскільки величина деформації матеріалу заготовки на кромці матриці за інших рівних умов залежить від радіусу заокруглення матриці, наступним кроком був підбір за результатами моделювання мінімально допустимого радіуса заокруглення кромки матриці у місці руйнування.

За результатами чисельних експериментів була підібрана відповідна геометрія матраці, за якої значення критерію руйнування вдалось знизити до критичного значення 0,6…0,62 (рис. 8).

Рис. 7. Характер руйнування скорегованої заготовки при деформуванні

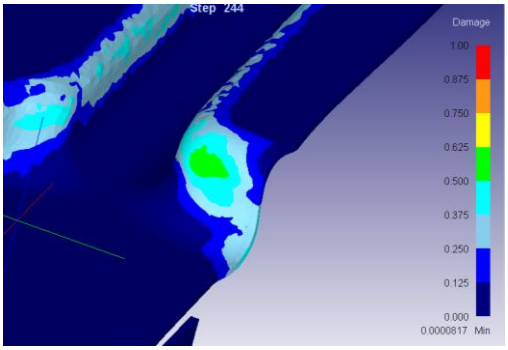


Рис. 8. Розподіл значень критерію руйнування за результатами моделювання деформування заготовки інструментом з оптимізованою геометрією

Відповідно до отриманих даних були скореговані геометрія та розміри деформуючої матриці. Остаточні результати по формуванню напівфабрикату корпусу представлені на рис. 9. Як видно з рисунку, деформування відбулось у відповідності до результатів моделювання, без руйнування заготовки в процесі деформування. При виготовленні експериментальної партії напівфабрикатів корпусу деформування заготовок відбувалось прогнозовано, без руйнування.

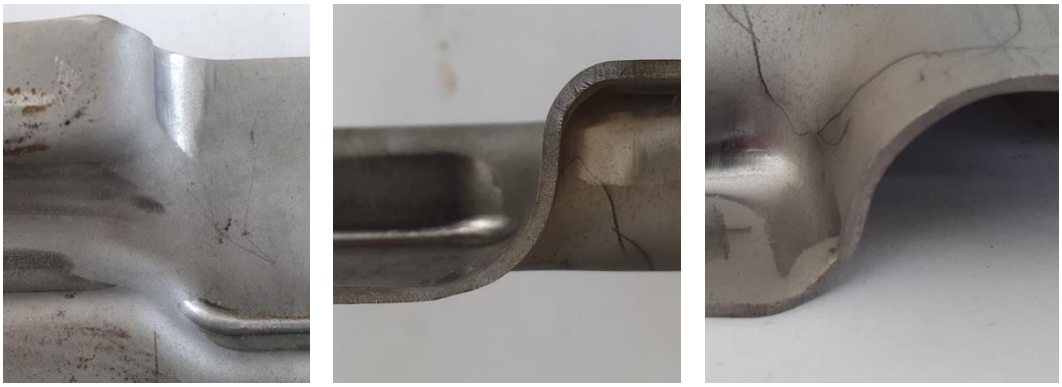


Рис. 9. Результати натурного експерименту по деформуванню заготовки інструментом з оптимізованою геометрією

ВИСНОВКИ

В роботі за результатами порівняльного аналізу комп’ютерного моделювання та натурних експериментів по деформуванню сталі 30ХГСА в процесі формовки напівфабрикату корпусної деталі великокаліберного кулемета встановлено, що використання граничного значення 0,6 критерію руйнування Normalized Cockcroft-Latham дозволяє за результатами моделювання ефективно прогнозувати руйнування листової заготовки в процесі формовки. Підтверджено, що якщо за результатами моделювання розраховані значення критерію руйнування не перевищують граничного значення, формовка в реальних умовах протікає без руйнування заготовки. Отримані результати досліджень дозволили шляхом моделювання оптимізувати форму вихідної заготовки та деформуючого інструменту з наступним їх доопрацюванням, що забезпечило подальше штампування напівфабрикату без руйнування.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Романовский В. П. Справочник по холодной штамповке. 6-е изд., перераб. и доп. Ленинград: Машиностроение. 1979. 520 с.

2. Справочник конструктора штампов: Листовая штамповка Под общ. ред. Л.И. Рудмана. Москва: Машиностроение. 1988. 496 с.

3. Стеблюк В.І., Орлюк М.В, Шкарлута Д.Б. Витягування вісесиметричних тонкостінних виробів із нержавіючої сталі 04Х18Н9Т. *Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні*: Тематич. зб. наук. пр. Краматорськ: ДДМА. 2007. С. 268–270.

4. Калюжний В. Л., Ярмоленко О. С., Марчук К. Л. Штампування із маловуглецевої сталі заготовки гільзи середніх розмірів. *Mechanics and Advanced Technologies*. 2021. 5. 1. С. 113–121.

5. Калюжний В.Л., Бісик С.П, Калюжний О.В., Горностай В.М. Підвищення продуктивності та зниження витрат металу при штампуванні латунних гільз великої довжини. *Озброєння та військова техніка*. Київ. 2021. 2(30). С. 85–95.

6. Stebunov S., Vlasov A., Biba N. Prediction of the fracture in cold forging with modified Cockcroft-Latham criterion. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978918309594

7. Власов А. В. Расчет поврежденности металла при холодной радиальной ковке по результатам конечно-элементного моделирования в программе Deform 3D. *Состояние, проблемы и перспективы развития кузнечно-прессового машиностроения и обработки давлением*: сборник докладов и материалов IX Конгресса «Кузнец-2009». Рязань. 2009. С. 204–218.

8. Орлюк М. В. Граничні значення критеріїв руйнування при моделюванні процесів витягування в середовищі DEFORM. *Обработка материалов давлением*. Краматорск: ДГМА. 2017. 2(45). С. 22–29. URL:http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/omd/omd_2(45)_2017/article/6.pdf

REFERENCES

1. Romanovskii V.P. Cold Forging Handbook. 6th edition revised and expanded. Leningrad: Machinebuilding. 1979. 520 p. *(in Russian).*

2. Die design Handbook: Sheet Metal Stamping. Under the general editorship of L.I. Rudmana. Moscow: Machinebuilding. 1988. 496 p. *(in Russian).*

3. Stebliuk V.I., Orliuk M.V, Shkarluta D.B. Axisymmetric drawing of thin-walled products made of stainless steel 04Cr18Ni9Ti. *Improvement of pressure processing processes and equipment in metallurgy and mechanical engineering:* Thematic collection of scientific papers. Kramatorsk: DSEA. 2007, pp. 268-270. *(in Ukrainian).*

4. Kaliuzhnyi V.L., Yarmolenko O.S., Marchuk K.L.. Stamping of mild steel blank of medium cartridge case. *Mechanics and Advanced Technologies*. 2021. 5. 1, pp. 113–121. *(in Ukrainian).*

5. Kaliuzhnyi V.L., Bisyk S.P, Kaliuzhnyi O.V., Hornostai V.M. Productivity increasing and metal consumption reducing while large length brass sleeves stamping. *Armament and military equipment.* Kyiv. 2021. 2(30), pp.85-95. *(in Ukrainian).*

6. Stebunov S., Vlasov A., Biba N. Prediction of the fracture in cold forging with modified Cockcroft-Latham criterion. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978918309594

7. Vlasov A.V. Metal damage calculation while cold radial forging according to the results of finite element simulation in Deform 3D software package. *State, problems, and prospects for the development of forging engineering and metal forming processes:* Reports and materials collection of the IX Congress "Blacksmith-2009". Ryazan. 2009, pp. 204–218. *(in Russian).*

8. Orliuk M.V. Limit values of fracture criteria while sheet drawing process simulating in DEFORM software package. *Materials Working by Pressure*. Kramatorsk: DSEA. 2017. 2(45), pp.22-29. URL: http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/omd/omd_2(45)_2017/article/6.pdf *(in Ukrainian).*

Orliuk M., Pimanov V. Using of the DEFORM software package to optimize sheet metal forming operations

Using only practical recommendations of reference literature while developing of the technology of parts with complex geometry manufacturing and stamping equipment design, does not ensure high-quality parts obtaining and defects absence, since these recommendations cannot consider all the features of deformation in specific conditions. In case of defects emergence during the stamping, developed technological process or existing stamping equipment needs to be improved. A similar problem, related to the material fracture, arose in the process of heavy machine gun body part stamping from a sheet steel blank made of 30CrMnSiA steel. To eliminate defects, the effectiveness of using the DEFORM software package was studied to determine the features of complex solid parts sheet metal forming and stamping process parameters optimization. Stamping process was studied using finite element method computer simulation in DEFORM 3D environment to acquired experimental results confirming. As a computer simulation optimization parameter limit values of Normalized Cockcroft-Latham criteria defined for axisymmetric sheet drawing operations were used. According to the results of the research, negative factors that led to overload of the workpiece material and its destruction in the process of deformation were identified. Obtained results made it possible to optimize the shape of the initial workpiece and the deforming tool. Deforming tool and workpiece geometry improvement was carried out on the condition of Normalized Cockcroft-Latham criteria limit value equal 0,6 defined for axisymmetric sheet drawing operations is not exceeded.

The results of the natural experiment proved the relevancy of the accepted assumptions. After making appropriate changes to the geometry of the initial workpiece and the deforming tool, the problem of the defects appearance during stamping was successfully solved.

Keywords: *stamping, optimization, forming, computer simulation, finite element method, fracture criteria.*

Орлюк М. В., Пиманов В. В. Использование программного комплекса DEFORM для оптимизации операций листовой формовки

Использование при разработке технологии изготовления деталей со сложной геометрией из листового материала и проектировании соответствующего штампового оснащения только практических рекомендаций справочной литературы не гарантирует получения качественных деталей и отсутствие брака по результатам штамповки, поскольку эти рекомендации не могут учесть все особенности деформирования в конкретных условиях. В случае появления при штамповке брака разработанный технологический процесс или существующее штамповое оснащение требует доработки. Подобная проблема, связанная с разрушением материала, возникла при штамповке корпусной детали крупнокалиберного пулемета из листовой заготовки из стали 30ХГСА. С целью устранения брака в работе была исследована эффективность использования программного комплекса DEFORM для определения особенностей листовой формовки сложных пространственных деталей и оптимизации параметров процесса деформирования. Процесс деформирования исследовался с помощью компьютерного моделирования с использованием метода конечных элементов в среде DEFORM 3D и проверки полученных результатов экспериментальным путем. При моделировании в качестве оптимизационного параметра в работе использовались предельные значения критерия разрушения Normalizet Cockcroft-Latham, определенные для операций осесимметричной вытяжки без утонения. По результатам исследований были выявлены негативные факторы, приводившие к перегрузке материала заготовки в процессе деформирования и его разрушения. Полученные результаты позволили оптимизировать форму исходной заготовки и деформирующего инструмента. Оптимизация геометрии деформирующего инструмента и заготовки велась при условии, что по результатам моделирования в наиболее деформированных участках заготовки рассчитанные значения критерия разрушения Normalizet Cockcroft- Latham не должны превышать предельного значения 0,6, определенного для операции осесимметричной вытяжки. Результаты натурного эксперимента подтвердили правомерность принятых допущений. После внесения соответствующих изменений в геометрию исходной заготовки и деформирующего инструмента проблема появления брака во время штамповки была успешно решена.

Ключевые слова *штамповка, оптимизация, формовка, численное моделирование, метод конечных элементов, критерий разрушения.*

Орлюк Михайло Володимирович – канд. техн. наук, доц. НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського»
Orliuk Mykhailo – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor NTU “I. Sikorsky KPI”
Орлюк Михаил Владимирович – канд. техн. наук, доц. НТУУ «КПИ им. И. Сикорского»
E-mail: minorkpi@ukr.net
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4728-9097

Піманов Валерій Володимирович – канд. техн. наук, доц. НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського»
Pimanov Valerii – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor NTU “I. Sikorsky KPI”
Пиманов Валерий Владимирович – канд. техн. наук, доц. НТУУ «КПИ им. И. Сикорского»
E-mail: pimanov@ukr.net
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6609-6904

НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського» – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ
NTU “I. Sikorsky KPI” – National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv
НТУУ «КПИ им. И. Сикорского» – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», г. Киев

Стаття надійшла до редакції 14.05.22 р.

УДК 621.762.4 DOI: 10.37142/2076-2151/2022-1(51)117

Драгобецький В. В.
Савєлов Д. В.
Молоштан Д. В.

РЕЗОНАНСНІ ЯВИЩА В ПРОЦЕСАХ ВІБРАЦІЙНОГО УЩІЛЬНЕННЯ ПОРОШКОВИХ ЗАГОТОВОК

У роботі розглянуто процес деформування дисперсної порошкової суміші вібраційним робочим органом, який здійснює періодичні коливання у вертикальній площині. Метою роботи є пошук шляхів зменшення величини роботи пластичної деформації у процесах ущільнення дисперсних порошкових середовищ під час виробництва порошкових заготовок. Під час поетапного деформування порошкової заготовки з певною кутовою частотою вимушених коливань відбувається релаксація напруженого стану та утворення поблизу концентраторів напружень резонансних явищ. Внаслідок розвитку процесів множинного ковзання формується хвиля пластичної деформації та розвивається вібропластичний ефект. Встановлено, що знаючи частоту періодичних елементарних зрушень пластичного перебігу і діючи на об'єм, що деформується зовнішнім навантаженням з тією ж або близькою частотою, можна узгодити хід пластичної плинності з характером застосування цього навантаження і, на основі складання двох періодичних процесів, створити вібропластичний резонанс. У зоні дефектів кристалічної решітки відбувається поглинання енергії коливань. Це призводить до підвищення потенційної енергії дислокацій, зменшення переміщення зсуваючого напруження та самоорганізації дисипативної системи. Отримані теоретичні залежності для визначення опору зсуву, енергії та ширини дислокації під час руху її з певною швидкістю, власної частоти зсувної деформації, згинального осесиметричного моменту імпульсу та моменту кількості руху. Виявлено, що у разі використання резонансних явищ у процесах формозміни порошкових заготовок виявлено значне скорочення деформувальних зусиль і, як наслідок, зниження роботи пластичної деформації.

Ключові слова: *порошкова суміш, пластична деформація, вібропластичний ефект, коливання, резонансні явища.*

Для виробництва порошкових заготовок використовуються різні методи, в яких, як правило, робочий орган ущільнюючої машини деформує металевий порошок, який знаходиться в товстостінній формі та уявляється у вигляді дисперсного порошкового середовища анізотропної структури. Одним із напрямків досліджень у галузі пластичного деформування є пошук можливості зниження величини роботи пластичного деформування та, як наслідок, зменшення енергетичних витрат.

Одним з методів інтенсифікації процесу деформування є хвильова дія на оброблюваний матеріал [1−8]. Багатьма дослідженнями з ущільнення дисперсних порошкових середовищ встановлено, що у разі застосування направлених поздовжніх коливань величина робочого зусилля зменшується тільки в тому випадку, коли швидкість коливальних рухів значно перевищує швидкість поздовжньої подачі, а застосування низькочастотних коливань ефективне лише у разі малих швидкостей деформування [1, 2].

Метою роботи є пошук шляхів зменшення величини роботи пластичної деформації у процесах ущільнення дисперсних порошкових середовищ під час виробництва порошкових заготовок.

Розглянемо процес виробництва порошкової заготовки вібраційним робочим органом, який здійснює спрямовані коливання у вертикальній площині (рис. 1).

У робочому режимі на пуансон 1 вібраційного робочого органу, який підвішений на пружних амортизаторах 2 до натискної плити 3, діє збудження у вигляді вертикально спрямованої гармонійної сили $P_в \sin \omega t$. В результаті цього пуансон 1 здійснює коливання у вертикальній площині та піддає вібраційному впливу дисперсну порошкову заготовку 4, що знаходиться у формі 5.

Рух цієї системи можна розглядати так: 1) удар пуансону об поверхню порошкової заготовки та її пластичне деформування; 2) відрив пуансону від деформованої поверхні порошкової заготовки та його рух у просторі до наступного удару.

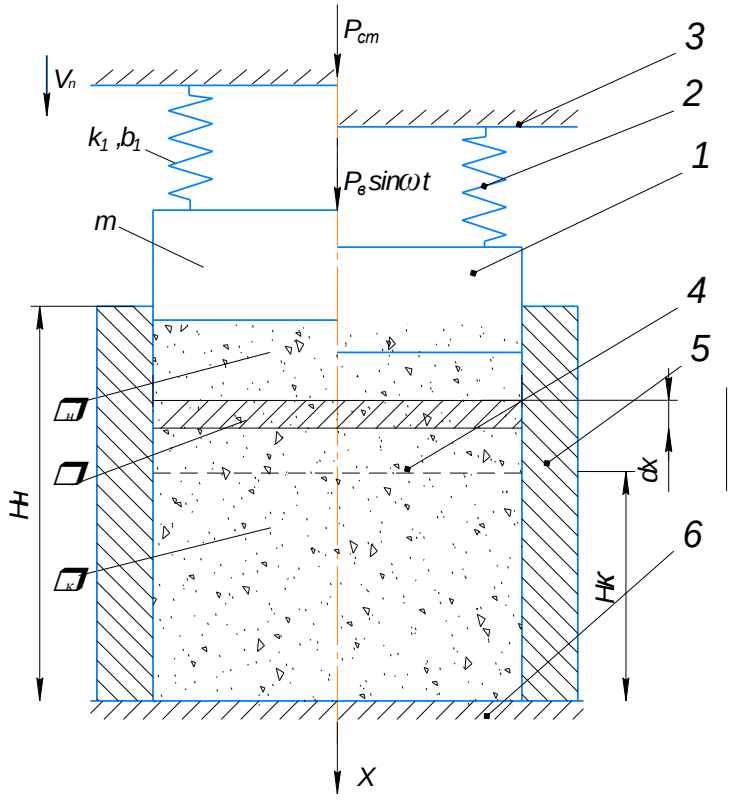


Рис. 1. Схема процесу деформування порошкової заготовки (1 − пуансон; 2 − пружний амортизатор; 3 − натискна плита; 4 − порошкова заготовка; 5 − форма; 6 − основа

Розглянемо перший етап руху пуансону. Розглянемо пластичне деформування порошкової маси як послідовність малих періодичних елементарних зрушень. Воно розвивається стрибкоподібно та обумовлено його хвильовою природою. Відповідно до останніх уявлень, пластична деформація є сукупністю послідовно протікаючих актів релаксації напруженого стану, створеного в матеріалі порошкової заготовки. Під час цих актів релаксації напруженого стану у сфері поблизу концентраторів напружень зароджуються резонансні явища.

Одним з визначальних актів пластичного формування є усунення дислокації вздовж площини ковзання. Для переходу дислокації з одного рівноважного стану до іншого їй необхідно подолати опір зсуву, який визначається так:

$$\tau_0 = \left(\frac{2 \cdot G}{K}\right) \cdot e^{-\frac{2 \cdot \pi \cdot \lambda}{K \cdot b}}, \qquad (1)$$

де $K \approx 1$ − константа; λ − ширина дислокацій; b − відстань між атомами у напрямку, перпендикулярному площині зсуву.

Енергія дислокації під час руху її зі швидкістю v можна оцінити за формулою:

$$E_v = \frac{E_0}{1 - \frac{v^2}{a_{cд}^2}}, \qquad (2)$$

де E_0 − енергія дислокації в стані спокою; $a_{cд}$ − швидкість хвилі під час деформації зсуву.

Зі збільшенням v енергія дислокації збільшується і у разі $v \to a_{cд}$, $E_v \to \infty$.

Ширина дислокації λ залежить від швидкості руху:

$$\lambda = \lambda_0 \sqrt{\frac{1-\nu^2}{a^2_{cд}}}, \tag{3}$$

де λ_0 – ширина дислокації в стані спокою.

На кінцевій стадії мікропластичності анізотропної порошкової суміші поведінка зсувів стає взаємно корельованою так, що один зсув ініціює наступний. Внаслідок розвитку множинного ковзання формується хвиля пластичної деформації. Вона є тимчасово-просторовою структурою, яка відображає процеси самоорганізації дисипативних систем.

З точки зору хвильової теорії пластичної плинності знаходить пояснення факт зменшення величини формозмінювального зусилля при високочастотному деформуванні. У зоні дефектів кристалічної решітки відбувається поглинання енергії коливань. Це призводить до підвищення потенційної енергії дислокацій та зменшення переміщення зсуваючого напруження [2].

Теоретично та експериментально обґрунтовано явище резонансного вібропластичного ефекту [1], що полягає у зниженні величини опору пластичної деформації в'язко-пружних та в'язкопластичних середовищ, і виникає в результаті природного узгодження періодичності елементарних зрушень пластичного перебігу цих середовищ з синхронізацією хвильового впливу.

Знання оптимальної частоти прикладеної деформуючої вібраційної (хвильової) дії дозволяє суттєво знизити його величину [9], а також вирішувати деякі технологічні завдання обробки металів та сплавів. Встановлено [9], що в результаті резонансного вібропластичного ефекту має місце зменшення залишкових напружень, які зберігаються у тілі виробів. Це дозволяє використовувати ефект у процесах калібрування, згинання, витягування, формування та інших операцій.

Таким чином, пластична плинність має періодичний характер і є послідовністю елементарних зрушень всередині одиночних кристалів або між окремими кристалічними зернами.

Власна частота зсувної деформації [1] визначається за залежністю:

$$\nu = G \cdot \mu^{-1}, \tag{4}$$

де G – модуль зсуву, *Па*; μ^{-1}, μ^{-1} – коефіцієнт внутрішнього тертя, кг/(м·с).

Оскільки пластична плинність викликається і підтримується зовнішнім навантаженням, вона відноситься до розряду автоколивальних процесів, а матеріал, який деформується – до категорії автоколивальних систем. У випадку близькості власних частот взаємодіючих систем відбувається підстроювання енергетично менш потужної коливальної системи під параметри коливань більш енергетично потужної системи.

Встановлено [9], що знаючи частоту періодичних елементарних зрушень пластичного перебігу ν і діючи на об'єм, що деформується зовнішнім навантаженням з тією ж або близькою частотою, можна узгодити хід пластичної плинності з характером застосування цього навантаження і, на основі складання двох періодичних процесів, створити вібропластичний резонанс.

Аналогічний ефект був досягнений в процесах гідровибухового штампування [2, 9]. Попередньо повідомивши заготовці кінетичну енергію, яка потім переходить в енергію вигину, наприклад, при зіткненні з рідинним передавальним середовищем або у разі створення імпульсного розрядження в порожнині матриці, стимулюємо початкову пластичну плинність. Початок вигину здійснюється з певною кутовою швидкістю ω, а деформація поширюється від периферії до центру порошкової заготовки.

Додатковий заряд вибухової речовини забезпечує отримання навантаження, рівномірно розподіленого по заготовці протягом малого проміжку часу $\Delta\tau$. У результаті заготовка не встигає внаслідок своєї інерційності почати деформуватися під дією імпульсу $q\Delta\tau$ (рух деформування має початися з нескінченно великим прискоренням внаслідок малості Δτ), оскільки виходить розрив в прискореннях (так званий «м'який удар»).

Імпульс $q\Delta\tau$ накладає на порошкову заготовку згинальний осесиметричний момент імпульсу, значення якого визначається за залежністю:

$$M(v)\Delta\tau = -\frac{2}{3}\pi \cdot q \cdot \left(\frac{R^3}{2} - r^3\right) \cdot \Delta\tau, \tag{5}$$

де q − навантаження; $\Delta\tau$ − проміжок часу; R − радіус заготовки; r − радіус поточного шару заготовки.

Момент імпульсу урівноважується зміною моменту кількості руху:

$$I\omega_B = \frac{4 \cdot \pi \cdot \delta \cdot H \cdot R^2}{q} \cdot \left(\frac{R^2}{2} - \frac{4}{3} r \cdot R + r^2\right) \cdot \omega_B, \tag{6}$$

де ω_B − кутова частота вимушених коливань; H − товщина заготовки; γ − питома вага заготовки.

В результаті на заготовку, що отримується, накладається вимушена частота коливань вигину.

Збіг за модулем у перерізі r* будь-якого шару швидкостей ω і ωс спричинить виникнення в останньому режимі автоколивань. У перерізі r* утворюється пружно-пластичній рухомий шарнір певної амплітуди, який забезпечує впорядковане деформування.

Деякі розглядають залишкові напруження в тілі виробу після деформування як певну кількість енергії в конкретному обсязі.

Ця енергія витрачається на роботу процесів, пов'язаних з короблением. У разі узгодження зовнішнього впливу з деформаційною поведінкою матеріалу останній виявляється у стані енергетично більш стабільному, ніж у разі навантаження, характер докладання якої довільний або не відповідає деформаційним процесам всередині матеріалу. Стабільність енергетичного (напруженого) стану у матеріалі визначає мінімальний ступінь післяопераційного короблення.

ВИСНОВКИ

У разі деформування з частотою, що лежить у межах смуги синхронізації по відношенню до частоти періодичних елементарних зрушень пластичної плинності, ступінь післяопераційного короблення виявилася мінімальною, на один-два порядки меншою, ніж у попередніх випадках. Також виявлено, що у разі використання резонансних явищ у процесах формозміни порошкових заготовок виявлено значне скорочення деформувальних зусиль і, як наслідок, зниження роботи пластичної деформації.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Кузнецов В. Е. О возможности динамического воздействия на пластическое деформирование металлов. *Изв. вузов. Черная металлургия*. 1993. 5. С. 23−26.

2. Драгобецкий В. В., Марцинюк О. Б., Троцко О. В. Резонансные явления в процессах изменения литовых заготовок. *Вісник КДПУ.* Кременчук: КДПУ, 2006. Вип. 6/2006 (41). Ч. 2. С. 25–26.

3. Савелов Д. В. Моделирование процесса прессования порошковой заготовки в жесткой пресс-форме вибрационно-статическим способом. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського.* Кременчук: КрНУ, 2015. 1/2015 (90), Ч. 1. С. 109–113.

4. Savelov D., Puzyr R., Dragobetsky V., Markevych A. Peculiarities of vibrational press dynamics with hard-elastic restraints in the working regime of metal powders molding. *Metallurgical and Mining Industry*. 2015. № 2, pp. 67–74.

5. Савелов Д. В. Моделирование процессов деформирования дисперсных и пористых порошковых заготовок. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського.* Кременчук: КрНУ. 2015. 3/2015 (92). Ч. 1. С. 74–78.

6. Савелов Д. В., Маркевич А. Г. Баглюк Г. А. Усовершенствование технологии и оборудования для интенсификации процесса вибрационно-статического прессования металлических порошков. *Порошковая металлургия: инженерия поверхности, новые порошковые композиционные материалы.* Сварка: сб. докладов 9-го межд. симпозиума 8-10 апреля 2015. Минск: Беларуская навука. С. 196–206.

7. Maslov O., Savielov D., Salenko Y., Javadova M. (2022) Theoretical Study of the Dynamic System «Vibration Platform − Polymer Concrete» Stress–Strain State. *Proceedings of the 3rd International Conference on Building Innovations. ICBI 2020. Lecture Notes in Civil Engineering, vol 181*. Springer, Cham, pp 191–201. https://doi.org/10.1007/978-3-030-85043-2_19.

8. Клименко В. М., Шаповал В. Н. Вибрационная обработка металлов давлением. Киев: Техника, 1977. 128 с.

REFERENCES

1. Kuznetsov V. E. On the possibility of dynamic influence on the plastic deformation of metals. *Ferrous metallurgy*. 1993. 5, pp. 23−26. *(in Russian).*

2. Dragobetsky V. V., Martsinyuk O. B., Trotsko O. V. Resonance phenomena in the processes of changing cast billets. Transactions of KDPU. Kremenchuk. KDPU. 2006. 6/2006 (41). P. 2, pp. 25–26. *(in Russian).*

3. Savelov D. Modelling of a powder-like work-piece compaction in a stiff die by a vibro- static method. *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, KRNU, Issue* 1/2015 (90), pp. 109–113 *(in Russian).*

4. Savelov D., Puzyr R., Dragobetsky V., Markevych A. Peculiarities of vibrational press dynamics with hard-elastic restraints in the working regime of metal powders molding. *Metallurgical and Mining Industry*. 2015. 2, pp. 67–74. *(in Russian).*

5. Savelov D. Modelling of the deformation process for dispersible and porous powder-like work-pieces. *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, KRNU,* 3/2015 (92), pp. 74–78 *(in Ukrainian).*

6. Savelov D. V., Markevich A. G. Baglyuk G. A. Improvement of technology and equipment for intensification of the process of vibration-static pressing of metal powders. *Powder metallurgy: surface engineering, new powder composite materials. Welding. Collection of reports 9 international symposium April 8-10, 2015*. Minsk: Belarusian Science, pp. 196–206. (*in Russian}.*

7. Maslov O., Savielov D., Salenko Y., Javadova M. (2022) Theoretical Study of the Dynamic System «Vibration Platform − Polymer Concrete» Stress–Strain State. *Proceedings of the 3rd International Conference on Building Innovations.* ICBI 2020. Lecture Notes in Civil Engineering, vol 181. Springer. Cham, pp 191–201. https://doi.org/10.1007/978-3-030-85043-2_19.

9. Klimenko V.M., Shapoval V.N. Vibration processing of metals by pressure. Kiev: Equipment. 1977. 128 p. *(in Russian).*

Drahobetskyi V., Savielov D., Moloshtan D. Resonance occurrences in processes of vibration compaction of powder preparations

The publication considered the process of deformation of a dispersed powder mixture by a vibrating working body that carries out periodic oscillations in the vertical plane. The purpose of the work is to find ways of decreasing the size of plastic deformation work in the processes of compaction of dispersive powder media during the production of powder preparations. During the phased deformation of the powder preparation with a certain angular frequency of forced oscillations, the stress state relaxes and resonance occurrences are formed near the stress concentrators. As a result of the development of multiple sliding processes, a wave of plastic deformation is formed and a vibroplastic effect develops. It was established that knowing the frequency of periodic elementary changes of the plastic course and acting on the volume deformed by an external load with the same or a similar frequency, it is possible to coordinate the course of plastic fluidity with the nature of the application of this load and, based on the combination of two periodic processes, create a vibroplastic resonance. Vibration energy is absorbed in the defect zone of the crystal lattice. This leads to an increase in the potential energy of dislocations, a decrease in the displacement of the shearing stress, and the self-organization of the dissipative system. Obtained theoretical dependences for determining the shear resistance, energy and width of the dislocation during its movement at a certain speed, natural frequency of shearing deformation, bending axisymmetric angular momentum and momentum of momentum. In the case of deformation with a frequency that lies within the synchronization band in relation to the frequency of periodic elementary shifts of plastic yield, the degree of postoperative warping was minimal, one to two orders of magnitude less than in previous cases. It was also found that in the case of using resonance occurrences in the processes of shape change of powder preparations, a significant reduction in the deformation forces and, as a result, a reduction in the work of plastic deformation was found.

Key words: *powder mix, plastic deformation, vibroplastic effect, vibration, resonance occurrences.*

Драгобецкий В. В., Савелов Д. В., Молоштан Д. В. Резонансные явления в процессах вибрационного уплотнения порошковых заготовок

В работе рассмотрен процесс деформирования дисперсной порошковой смеси вибрационным рабочим органом, совершающим периодические колебания в вертикальной плоскости. Целью работы является поиск путей уменьшения работы пластической деформации в процессах уплотнения дисперсных порошковых сред при производстве порошковых заготовок. При поэтапном деформировании порошковой заготовки с определенной угловой частотой вынужденных колебаний происходит релаксация напряженного состояния и образование вблизи концентраторов напряжений резонансных явлений. В результате развития процессов множественного скольжения формируется волна пластической деформации и развивается вибропластический эффект. При этом, зная частоту периодических элементарных сдвигов пластического течения и воздействуя на деформируемый объем внешней нагрузкой с той же или близкой частотой, можно согласовать ход пластической текучести с характером применения этой нагрузки и, на основе составления двух периодических процессов, создать вибропластический резонанс. В зоне дефектов кристаллической решетки происходит поглощение энергии колебаний. Это приводит к повышению потенциальной энергии дислокаций, уменьшению перемещения сдвигающего напряжения и самоорганизации диссипативной системы. Получены теоретические зависимости для определения сопротивления сдвигу, энергии и ширины дислокации во время движения ее с определенной скоростью, частоты сдвиговой деформации, изгибающего осесимметричного момента импульса и момента количества движения. Установлено, что в случае использования резонансных явлений в процессах формоизменения порошковых заготовок наблюдается значительное снижение деформирующих усилий и, как следствие, уменьшение работы пластической деформации.

***Ключевые слова**: порошковая смесь, пластическая деформация, вибропластический эффект, колебания, резонансные явления.*

Драгобецький Володимир Вячеславович − д-р техн. наук, професор, зав. кафедрою КрНУ ім. М. Остроградського

Drahobetskyi Volodymyr − Doctor of Technical Sciences, Full Professor of KrNU

Драгобецкий Владимир Вячеславович − д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой КрНУ им. М. Остроградского

E-mail: vldrag@kdu.edu.ua

ORCID: http://orcid.org/ 0000-0001-9637-3079

Савєлов Дмитро Володимирович – канд. техн. наук, доцент КрНУ ім. М. Остроградського

Savielov Dmitry − Associate Professor of the Department of KrNU

Савелов Дмитрий Владимирович – канд. техн. наук, доцент КрНУ им. М. Остроградского

E-mail: dvsavelov@gmail.com

ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5170-9621

Молоштан Дмитро Васильович – канд. техн. наук, доцент КрНУ ім. М. Остроградського

Moloshtan Dmytro − Associate Professor of KrNU

Молоштан Дмитрий Васильевич – канд. техн. наук, доцент КрНУ им. М. Остроградского

E-mail: tm@kdu.edu.ua

ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8881-8541

КрНУ ім. М. Остроградського – Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, м. Кременчук

KrNU – Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Kremenchuk

КрНУ им. М. Остроградского – Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского, г. Кременчуг

Стаття надійшла до редакції 10.06.22 р.

РОЗДІЛ ІІІ
ПРОЦЕСИ ОБРОБКИ ТИСКОМ У МЕТАЛУРГІЇ

УДК 621.96.002.5 DOI: 10.37142/2076-2151/2022-1(51)123

Карнаух С. Г.

ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ЗАГОТОВОК, ОТРИМАНИХ СПОСОБОМ ЛОМКИ ЗГИНОМ ПРИ СТАТИКО-ДИНАМІЧНОМУ НАВАНТАЖЕННІ НА ПРЕС-МОЛОТІ

Із усіх способів поділу сортового прокату на мірні заготовки, застосовуваних у сучасних заготівельних виробництвах, найбільш продуктивними й економічними є безвідхідні способи поділу сортового прокату: відрізка зсувом і холодна ломка згином. Метою роботи є підвищення якості заготовок способом ломки згином прокату шляхом дослідження процесу поділу при статико-динамічному навантаженні на прес-молоті. Комбіноване статико-динамічне навантаження при холодній ломці згином дозволяє знизити високочастотні коливання системи «інструмент – зразок – опори», виключити порушення контакту зразка з опорами, зменшити пікові величини сил з боку бойка й опор. Наявність статичної сили в момент удару забезпечує певний вихідний рівень напружень розтягання у зоні концентратора напружень, що підвищує керованість тріщиною. Передбачається, що руйнуюча тріщина при цьому завжди буде поширюватися в області напружень розтягання, що підвищує якість поділюваних заготовок. Більш відчутне підвищення якості заготовок буде проявлятися при поділі зразків великих поперечних перерізів. Реактивні сили з боку опор від дії статичної сили збігаються з напрямком інерційних сил половинок зразка й додатково доламують зразок. При цьому зі збільшенням довжини зразка зменшується величина його відриву від опор у початковій фазі навантаження, що позитивно позначається на якості розділяємих заготовок. Результати експериментів показують, що величина статичної сили, яка необхідна для виключення відриву зразка від опор, залежить від жорсткості контакту бойка із проміжним пуансоном і збільшується з ростом жорсткості проміжного пуансона. Величину жорсткості контакту бойка із проміжним пуансоном слід вибирати оптимальною за рахунок спеціальної конструкції пуансона. Експериментально встановлене, що величина попередньої статичної сили повинна бути не менш 40 % від сили, при якій відбувається руйнування зразка. Аналіз геометричної точності заготовок дозволив зробити висновок про те, що з підвищенням швидкості деформування якість заготовок поліпшується. Але найбільш висока якість заготовок спостерігається при статико-динамічному навантаженні. Отримані результати можуть бути використані для вдосконалювання технології процесу поділу сортового прокату на мірні заготовки способом холодної ломки згином.

***Ключові слова**: заготовка, прокат, холодна ломка згином, статико-динамічне навантаження, жорсткість, якість, собівартість.*

На сучасному етапі розвитку машинобудування проблема економічного використання енергоресурсів і металу при його переробці пред'являє усе зростаючі вимоги до технології й устаткуванню для поділу вихідних матеріалів на заготовки. Це вимагає розвитку всього різноманіття відомих і створення нових ефективних процесів розділення прокату і устаткування для їхньої реалізації [1–3].

На кожному машинобудівному підприємстві операція поділу сортового прокату є типової й масовою. Враховуючи, що у світі щомісяця виробляють десятки мільйонів заготовок із прокату, стає очевидною актуальність робіт, спрямованих на вдосконалювання існуючих і розробку нових технологій виробництва заготовок [4–7].

Із усіх способів поділу сортового прокату на мірні заготовки, застосовуваних у сучасних заготівельних виробництвах, найбільш продуктивними й економічними є безвідхідні способи поділу сортового прокату: відрізка зсувом і холодна ломка згином [8, 9]. Комплексні дослідження безвідхідних способів поділу сортового прокату широко проводилися на території України [10-12] і за кордоном: Англії, Німеччини, Японії й ін. [1–7]. За цей час накопичений великий обсяг матеріалів про природу, механізми й критерії руйнування. У розвиток цієї науки

внесли істотний вклад учені: K. Kessler, O. Keller, T. Nakagawa, T. Ekobori, E. Orovan, B. M. Финкель, В. Т. Мещерин, В. Р. Романовский, С. С. Соловцев, В. А. Тимощенко й багато інші [1, 5, 10–12].

У даній роботі досліджується спосіб поділу сортового прокату холодною ломкою згином. Сутність способу полягає в попередньому нанесенні на прокат концентратора напружень і згин прокату до руйнування в площині концентратора напружень. Крихка тріщина по своїх потенційних можливостях – ідеальний інструмент для безвідхідного поділу твердих матеріалів на частини. При цьому витрати енергії на розділення наближаються до свого мінімально можливого теоретичного рівня [8, 9, 10–12]. Однак широкому впровадженню даного способу поділу перешкоджає нестабільний характер поширення тріщини, що приводить до невисокої якості заготовок.

Розробка й застосування ефективних методів керування руйнуванням дозволяють значно поліпшити спосіб ламання прокату на заготовки й створити принципово нові методи, придатні для одержання заготовок під механічну обробку. У їхній основі лежить розуміння причин, що приводять до небажаних відхилень тріщини від заданої траєкторії, що дозволяє запропонувати діючі способи поліпшення якості поверхні розділення [12].

Перспективними напрямками вдосконалювання холодної ломки згином є підвищення швидкості навантаження й створення складного напруженого стану, що ускладнює пластичний плин у зоні зламу [13].

Метою роботи є підвищення якості заготовок способом ломки прокату шляхом дослідження процесу поділу при статико-динамічному навантаженні на прес-молоті.

У роботі [13, 14] розроблена комплексна математична модель процесу статико-динамічного навантаження зразків за схемою три точкової холодної ломки згином на прес-молоті з однаковим напрямком деформуючих сил, що відрізняється обліком попереднього статичного навантаження й конструктивних особливостей прес-молота. Аналіз результатів моделювання поділу зразків зі Сталі 45 (рис. 1) показує, що наявність статичного навантаження в момент удару приводить до більш плавного навантаження зразка, різкі піки сил на розрахункових кривих зникають. Збільшення статичної складової F_{st} приводить до росту амплітуди сил на інструменті й на опорах, хоча максимальне значення амплітуди для ударного навантаження вище у зв'язку з наявністю пікових значень сил. Величина статичного навантаження, необхідна для запобігання відриву зразка від опор, підвищується з ростом жорсткості контакту бойка й проміжного пуансона C_2 (см. рис. 1, в) [13, 14].

Для перевірки теоретичних розрахунків проведені експериментальні дослідження процесу поділу сортового прокату за схемою три точкової холодної ломки згином при статичному, динамічному й статико-динамічному навантаженні.

Для проведення експериментів використовувався прес-молот оригінальної конструкції із параметрами: $W = 0 \ldots 1300$Дж; сила статичного привода $F_{st} = 0 \ldots 100$кН; швидкість бойка $V = 0 \ldots 20$ м/с; об'єм робочої рідини $Q = 12 \cdot 10^{-3}$м^3; тиск робочої рідини $p = 0 \ldots 18$МПа; маса бойка $m_2 = 2{,}00$кг. Жорсткість контакту бойка й проміжного пуансона $C_2 = 100$ МН/м.

На рис. 2 наведена схема реєстрації даних при проведенні експериментів (рис. 2, а): 1 – ломатель; 2 – тензодатчики; 3 – зразок; 4 – опори, конструктивна схема (рис. 2, в), а також фото прес-молота (рис. 2, б) і оснастка (рис. 2, г) [13].

Установка для поділу зразків способом холодної ломки згином (див. рис. 2, в) складається із: станини 1, у напрямних якої розміщаються механізми затискача прокату, ломателя й опор, установлених з можливістю зворотно-поступального руху, обмеженого упорами 2 і накладками 3, які кріпляться до станини 1 болтами. Положення механізмів затискача, ломателя й опор фіксується за допомогою болтів 4, укручених в упори 2, гайок 5 і проставок 6. Механізм ломателя складається із корпусу 7, ломателя 8, установленого з можливістю зворотно-поступального руху в напрямних корпусу 7. Механізм опори складається з корпусу 9 і опорної пластини 10, яка утримується накладкою 11 за допомогою болтів із шайбами. Зразок 12 розміщається між двома опорними пластинами 10 і навантажується силою в площині концентратора напружень, нанесеного на зразок 12 посередині.

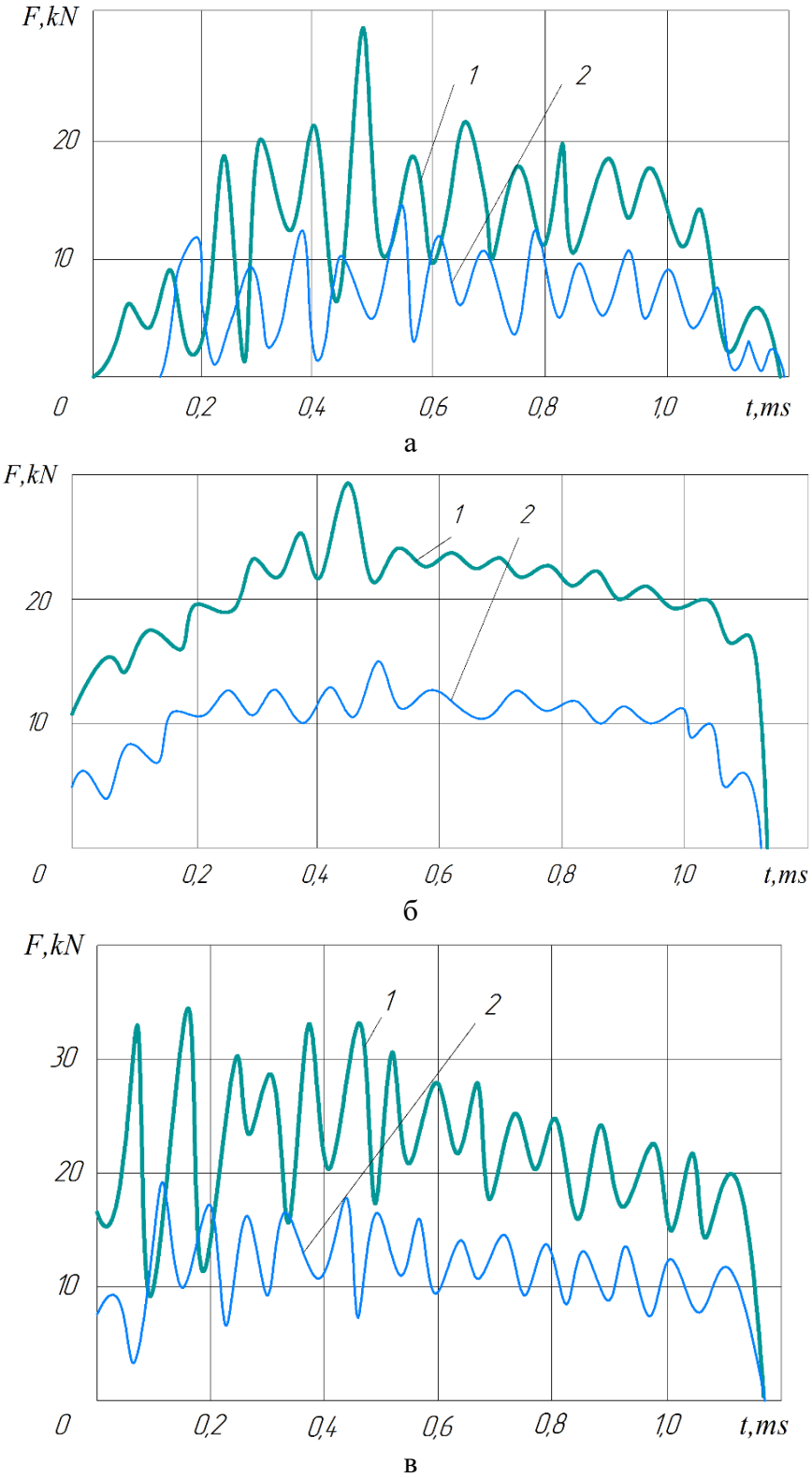
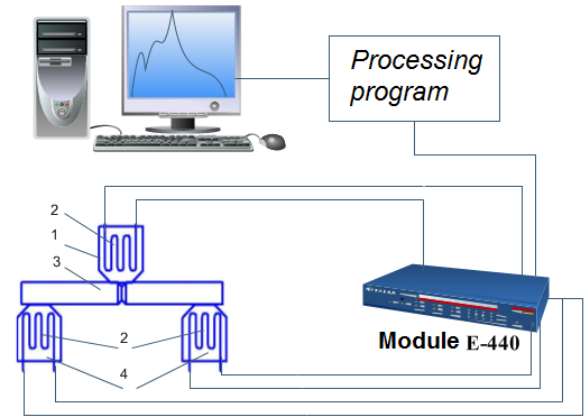
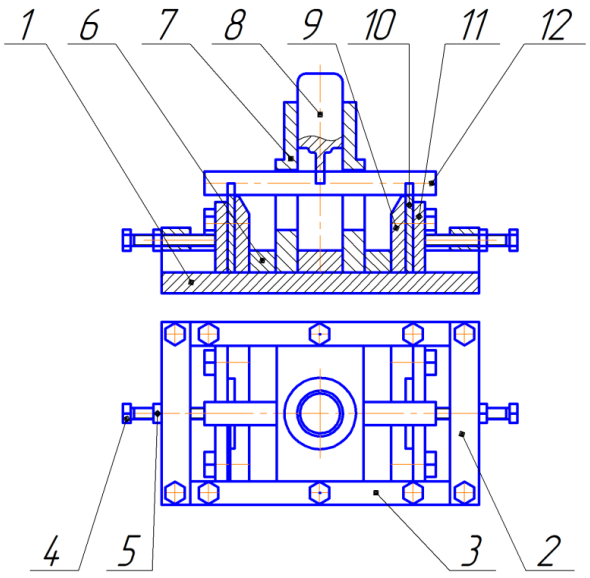


Рис. 1. Розрахункові криві зміни сил на контакті бойка зі зразком $F_4 = f(t)$ і зразка з опорами $F_6 = f(t)$: а – динамічне (ударне) навантаження $C_2 = 100\,MN/m$; б – статико-динамічне навантаження $F_{st} = 12kN, C_2 = 100\,MN/m$; в – статико-динамічне навантаження $F_{st} = 17F$, $C_2 = 500\,MN/m$ (Сталь 45)

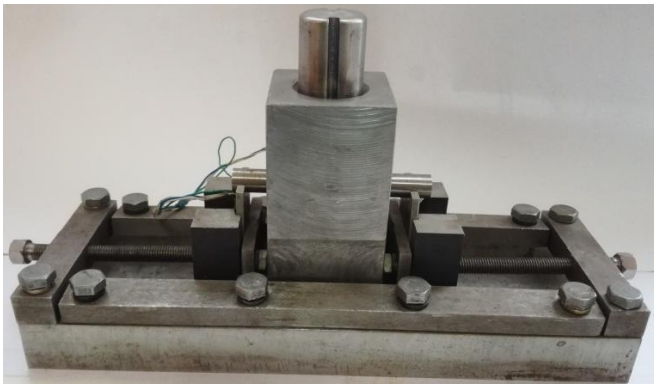


а

б



в



г

Рис. 2. Схема реєстрації експериментальних даних (а), конструктивна схема (б) і фото експериментального устаткування (в) і оснастки (г) [15, 16]

Інформація з тензодатчиків через універсальний реєструючий пристрій багатоканального збору інформації $E-440$ подавалася до ПЕОМ. В ПЕОМ, після обробки з використанням оригінальної програми, інформація зберігалася в табличному й графічному видах, зручних для наступного аналізу. Основні характеристики реєструючого пристрою $E-440$: цифровий сигнальний процесор $ADSP-2185M$ тактовою частотою роботи 48 MH; 16 диференціальних каналів або 32 каналу із загальною землею для аналогового введення з можливістю автоматичного коректування нуля; максимальна частота роботи 14-бітного $ADC-400$ кН, що дозволяє використовувати даний пристрій для дослідження ударних процесів.

Завдяки кільком каналам реєстрації сигнали записувалися одночасно по двом каналам: на ломателі й на опорах (див. рис. 2, б).

В експерименті використовувалися циліндричні зразки з розмірами: $d = 16$ мм; $L = 76$ мм; $L_0 = 60$ мм. Маса зразка $m_6 = 0{,}25$ кг. Зразки виготовлені із сортового прокату з різних марок

сталей, що перебувають у: пластичному – Сталь 20, пружнопластичному – Сталь 45 і крихкому стані – Сталь ШХ15. Механічні властивості матеріалів зразків представлені в табл. 1. На зразки попередньо за допомогою токарського різця наносили концентратори напружень у формі кільцевої канавки трикутного профілю з параметрами: глибина $\Delta H = 1{,}5$ мм; радіус при вершині – $\Delta r = 0{,}15$ мм. Плече прикладення навантаження $L_0/2 = 30$ мм. Розміри зон деформування й руйнування зразків визначали шляхом аналізу поверхні зламу з використанням мікроскопа.

Таблиця 1

Механічні властивості матеріалів зразків

Марка сталі	σ_{02}, МПа	σ_B, МПа	δ%	ψ, %	HB
Сталь 20	245	470	19	42	161
Сталь 45	360	610	16	40	197
Сталь ШХ15	900	1080	8	36	360

Результати вимірів представлені в табл. 2.

Таблиця 2

Експериментальні виміри сил на ломателі й опорі при статичному, динамічному й статико-динамічному навантаженні

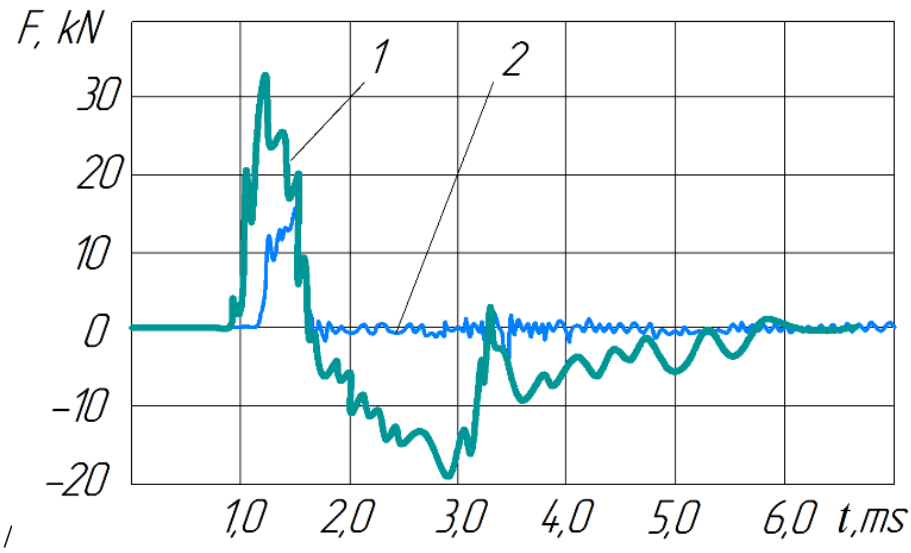
Марка сталі	Сила розділення, kN					
	при статичному навантаженні		при динамічному навантаженні		при статико-динамічному навантаженні	
	на ломателі	на опорі	на ломателі	на опорі	на ломателі	на опорі
Сталь 20	33	17	32	16	33	16
Сталь 45	33	16	32	16	34	17
Сталь ШХ15	35	18	34	17	36	18

Згладжені графіки зміни силових параметрів процесу три точкової холодної ломки згином залежно від часу для зразків зі Сталь 45 при динамічному й статико-динамічному навантаженні представлені на рис. 3.

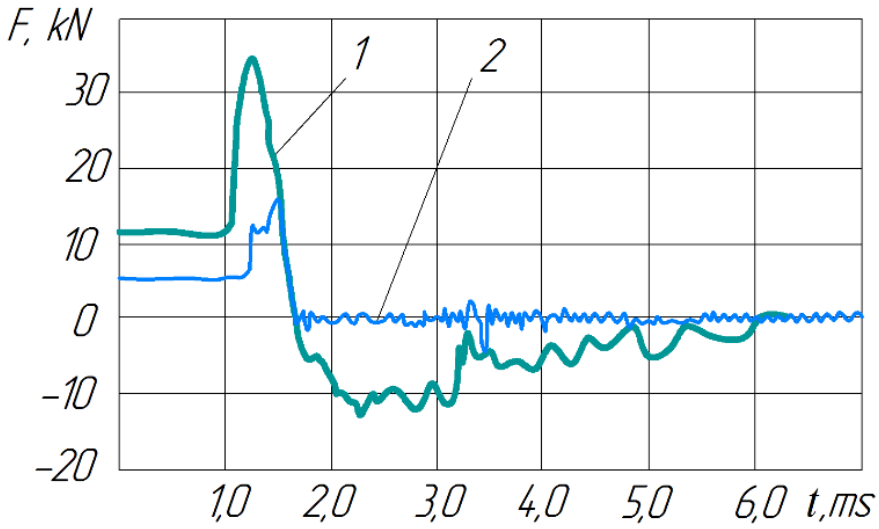
Аналіз результатів експериментальних досліджень (див. рис. 3) показує відсутність контакту між зразком 15 і опорами 13 у початковій фазі навантаження [14, 15, 16]. Причиною відриву зразка від опор є інерція його половинок і висока жорсткість опор при відносно малій жорсткості зразка.

Це підтверджує виводи про те, що в первісний момент часу зразок відривається від опор. Максимальні значення сил (див. рис. 3, а): $F_4 \cong 33kN$, $F_6 \cong 16kN$ (Сталь 45) незначно відрізняються від розрахованих вище, відповідно до розробленої математичної моделі: $F_4 \cong 29kN$, $F_6 \cong 14kN$. Трохи завищені експериментальні результати пояснюються необхідністю більш коректного врахування жорсткості зразка C_{bar} у площині розділення й жорсткості контакту бойка й проміжного пуансона – C_2.

Час, за який відбувається процес руйнування для зразків з різних марок сталей склав: Сталь 20 – $t \cong 2{,}0ms$; Сталь 45 – $t \cong 0{,}8ms$; Сталь ШХ15 – $t \cong 0{,}9ms$, що відповідає розрахунковій моделі.



а



б

Рис. 3. Експериментальні залежності зміни сил на контакті ломателя зі зразком $F_4 = f(t)$ – 1 і зразка з опорами $F_6 = f(t)$ – 2 (показання двох каналів, що знімаються одночасно) для зразків зі сталі 45 при динамічному (а) і статико-динамічному навантаженні (б)

Зразки при статико-динамічному навантаженні розділяли способом ломки за схемою триточкового згину при попередньому статичному зусиллі $F_{st} = 12kN$, величина якого визначена експериментальним шляхом з урахуванням рекомендацій.

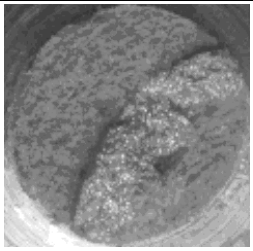
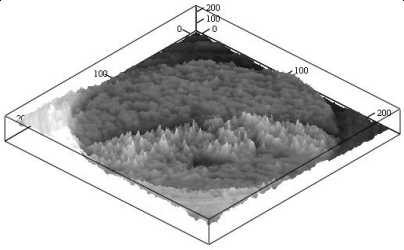
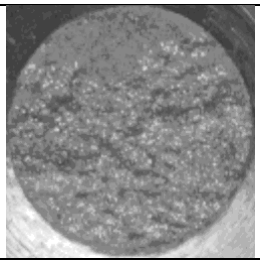
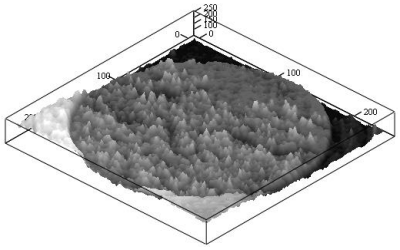
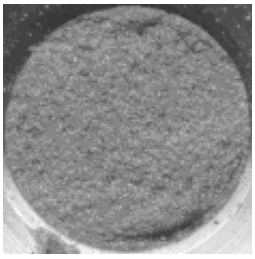
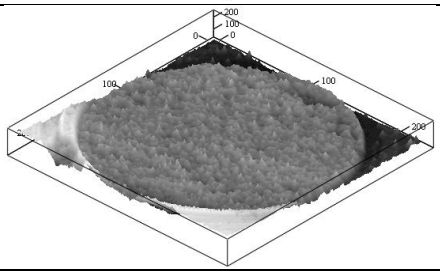
Аналіз результатів експериментів (див. рис. 3,б) показує, що наявність попереднього статичного навантаження виключає відрив зразка від опор, що підтверджує адекватність математичної моделі. Попереднє статичне навантаження зразка на прес-молоті підвищує його жорсткість і забезпечує його вихідний зсув на контакті з опорами.

Максимальні значення сил F_4, F_6 при статико-динамічному навантаженні виявилися вище в порівнянні з динамічним навантаженням (див. табл. 2), але не значно. Це пояснюється наявністю статичної складової F_{st}.

Результати фрактального аналізу торців заготовок зі сталей: Сталь 20, Сталь 45, Сталь ШХ15 при статичному, динамічному й статико-динамічному навантаженні представлені в табл. 3-5.

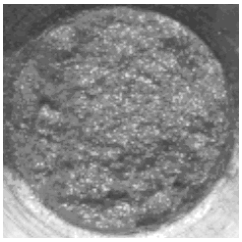
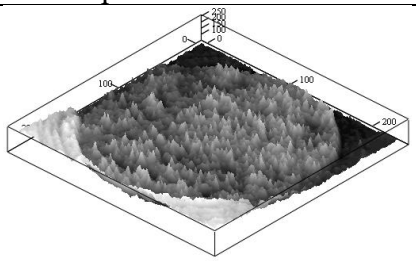
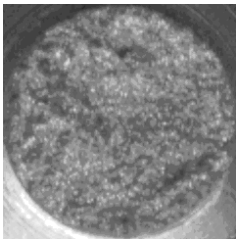
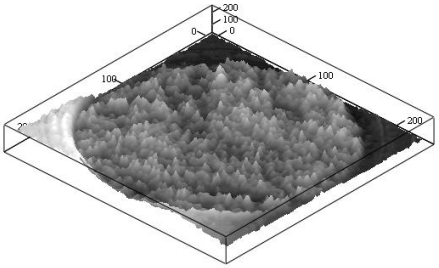
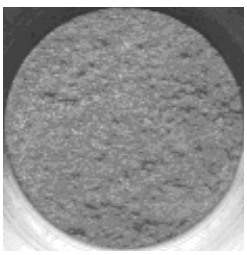
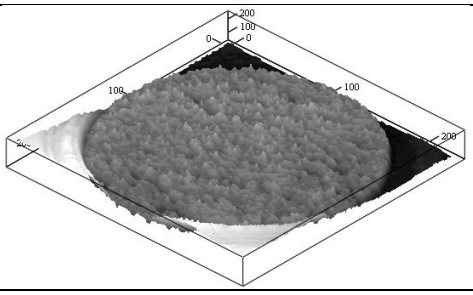
Таблиця 3

Фрактальний аналіз торців заготовок при статичному навантаженні [16, 17]

Матеріал	Фото торця зразка	Фрактальний аналіз
Сталь 20		
Сталь 45		
Сталь ШХ15		

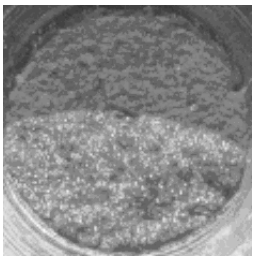
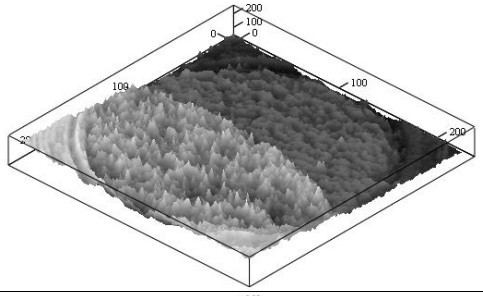
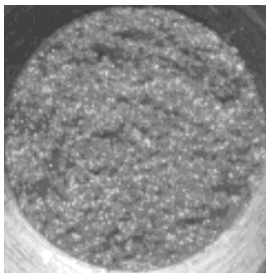
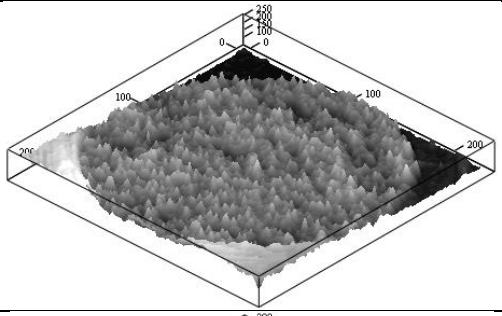
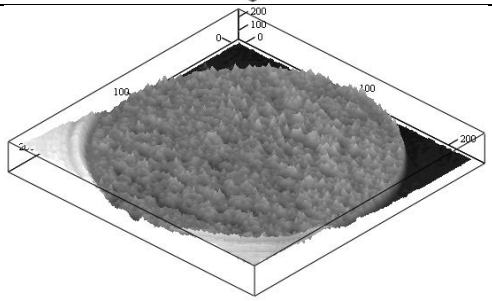
Таблиця 4

Фрактальний аналіз торців заготовок при динамічному (ударному) навантаженні [16, 17]

Матеріал	Фото торця зразка	Фрактальний аналіз
Сталь 20		
Сталь 45		
Сталь ШХ15		

Таблиця 5

Фрактальний аналіз торців заготовок при статико-динамічному навантаженні [16, 17]

Матеріал	Фото торця зразка	Фрактальний аналіз
Сталь 20		
Сталь 45		
Сталь ШХ15		

Аналіз геометричної точності заготовок дозволив зробити висновок про те, що з підвищенням швидкості деформування якість заготовок поліпшується. Але найбільш висока якість поділюваних заготовок спостерігається при статико-динамічному навантаженні. Даний висновок зроблено на підставі порівняння величин шорсткості торців заготовок, отриманих при статичному, динамічному й статико-динамічному навантаженні (рис. 4). Наприклад, для сталі 20 шорсткість при статичному навантаженні склала $Rz215$, а при статико-динамічному навантаженні на 30% менше – $Rz168$. Для сталі 45 відповідно на 25% менше ($Rz138$ ... $Rz178$). Для сталі ШХ15 показники шорсткості найнижчі й перебувають у діапазоні $Rz125$ ... $Rz135$[16].

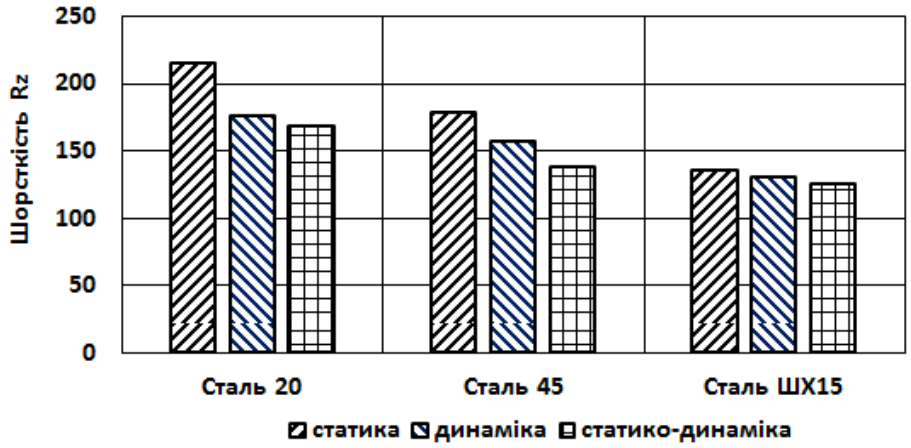


Рис. 4. Величина шорсткості торців заготовок, отриманих при статичному, динамічному й статико-динамічному навантаженні з різних марок сталей

ВИСНОВКИ

1. Комбіноване статико-динамічне навантаження при холодній ломці згином дозволяє знизити високочастотні коливання системи «інструмент – зразок – опори», виключити порушення контакту зразка з опорами, понизити пікові величини сил з боку бойка й опор.

2. Наявність статичної сили в момент удару забезпечує певний вихідний рівень напружень розтягання у зоні концентратора напружень, що підвищує керованість тріщиною. Передбачається, що руйнуюча тріщина при цьому завжди буде поширюватися в області напружень розтягання, що підвищує якість заготовок. Більш відчутне підвищення якості заготовок буде проявлятися при поділі зразків більших поперечних перерізів.

3. Реактивні сили з боку опор від дії статичної сили збігаються з напрямком інерційних сил половинок зразка й додатково доламують зразок. При цьому зі збільшенням довжини зразка зменшується величина його відриву від опор у початковій фазі навантаження, що позитивно позначається на якості поділяємих заготовок.

4. Результати експериментів показують, що величина статичної сили, яка необхідна для виключення відриву зразка від опор, залежить від жорсткості контакту бойка із проміжним пуансоном і збільшується з ростом жорсткості цього контакту. Величину жорсткості контакту бойка із проміжним пуансоном слід вибирати оптимальною за рахунок спеціальної конструкції пуансона. Експериментально встановлене, що величина попередньої статичної сили повинна бути не менш 40% від сили, при якій відбувається руйнування зразка.

5. Аналіз геометричної точності заготовок дозволив зробити висновок про те, що з підвищенням швидкості деформування якість заготовок поліпшується. Але найбільш висока якість поділюваних заготовок спостерігається при статико-динамічному навантаженні.

6. Отримані результати можуть бути використані для вдосконалювання технології процесу поділу сортового прокату на мірні заготовки способом холодної ломки згином.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Liu Y., Hua L., Mao H. et al. Finite element simulation of effect of part shape on forming quality in fine-blanking process. *Procedia Engineering.* № 81 (2014). P. 1108-1113.

2. Zheng Q., Zhuang X., Zhao Z. et al. State-of-the-art and future challenge in fine-blanking technology. *Production Engineering*. № 13 (2019). P. 61–70.

3. Hu X. H., Choi K. S., Sun X. et al. Edge fracture prediction of traditional and advanced trimming processes for AA6111-T4 sheets. *Journal of Manufacturing Science and Engineering.* № 136 (2014). 021016 (11 pages).

4. Zhao P. J., Chen Z. H., Dong C. F. et al. Experimental and numerical analysis of micromechanical damage for DP600 steel in fine-blanking process. *Journal of Materials Processing Technology.* № 236 (2016). P. 16–25.

5. Wang S., Chen Z., Dong C. et al. Tearing failure of ultra-thin sheet-metal involving size effect in blanking process: Analysis based on modified GTN model. *International Journal of Mechanical Sciences.* № 133 (2017). P. 288-302.

6. Barik J., Sonkamble V., Narasimhan K. et al. Burr formation and shear strain field evolution studies during sheet metal blanking. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. № 418 (2018). 012068 (8 pages).

7. Tanaka T., Hagihara S., Tadano Y. et al. Application of finite element method to analysis of ductile fracture criteria for punched cutting surfaces. *Materials Transactions.* № 54 (2013). P. 1697–1702.

8. Sergii G. Karnaukh, Nataly V. Chosta, Oleg E. Markov et al. Development and research of the press operating mechanism, made in the form of the wedge-joint mechanism with a curving wedge for separation operations. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. Vol. 116(2021). P. 3305–3314. https://doi.org/10.1007/s00170-021-07718-8.

9. Karnaukh S. G., Markov O. E. , Aliieva L. I. et al. Designing and researching of the equipment for cutting by breaking of rolled stock. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. T. 109. Issue 9-12. 2020. P. 2457–2464. https://doi.org/10.1007/s00170-020-05824-7.

10. Соловцов С. С. Безотходная разрезка сортового проката в штампах. Москва: Машиностроение. 1985. 176 с.

11. Lisunets N. L. Usage of physical and mathematical simulation for improvement of the processes of metal shear cutting. *CIS Iron and Steel Review*. № 17(2019). P. 34–38.

12. Финкель В. М., Головин Ю. И., Родюков Г. Б. Холодная ломка проката. Москва: Металлургия. 1982. 192 с.

13. Karnaukh S. G. Studying the process of static-dynamic loading of a preform according to the scheme of three-point breaking by bending in press-hammers. *Kuznechno-Shtampovochnoe Proizvodstvo (Obrabotka Metallov Davleniem).* № 2(2001). P. 8–12.

14. Karnaukh S. G., Markov O. E., Kukhar V. V. et al. Research of the rolled stock separating into workpieces using breaking by bending with dynamic and static-dynamic force. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.* Vol. 120 (2022). P. 2763–2776. https://doi.org/10.1007/s00170-022-08902-0.

15. Karnaukh S., Karnaukh D. Research of the influence of deformation speed on energy and power adjectives of the process of three-point cold bend breaking and on alignment integrity of raw parts. *Metallurgical and Mining Industry.* № 3(7). 2011. P. 107–114.

16. Karnaukh S.G., Markov O.E., Kukhar V.V. et al. Classification of steels according to their sensitivity to fracture using a synergetic model. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. Vol.119 (2022). P. 5277–5287. https://doi.org/10.1007/s00170-022-08653-y.

REFERENCES

1. Liu Y., Hua L., Mao H. et al. Finite element simulation of effect of part shape on forming quality in fine-blanking process. *Procedia Engineering*. № 81 (2014). P. 1108–1113.

2. Zheng Q., Zhuang X., Zhao Z. et al. State-of-the-art and future challenge in fine-blanking technology. *Production Engineering.* № 13 (2019). P. 61-70.

3. Hu X. H., Choi K. S., Sun X. et al. Edge fracture prediction of traditional and advanced trimming processes for AA6111-T4 sheets. *Journal of Manufacturing Science and Engineering.* № 136 (2014). 021016 (11 pages).

4. Zhao P. J., Chen Z. H., Dong C. F. et al. Experimental and numerical analysis of micromechanical damage for DP600 steel in fine-blanking process. *Journal of Materials Processing Technology*. № 236 (2016). P. 16–25.

5. Wang S., Chen Z., Dong C. et al. Tearing failure of ultra-thin sheet-metal involving size effect in blanking process: Analysis based on modified GTN model. *International Journal of Mechanical Sciences*. № 133 (2017). P. 288–302.

6. Barik J., Sonkamble V., Narasimhan K. et al. Burr formation and shear strain field evolution studies during sheet metal blanking. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. № 418 (2018). 012068 (8 pages).

7. Tanaka T., Hagihara S., Tadano Y. et al. Application of finite element method to analysis of ductile fracture criteria for punched cutting surfaces. *Materials Transactions*. № 54 (2013). P. 1697–1702.

8. Sergii G. Karnaukh, Nataly V. Chosta, Oleg E. Markov et al. Development and research of the press operating mechanism, made in the form of the wedge-joint mechanism with a curving wedge for separation operations. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.* Vol. 116(2021). P. 3305–3314. https://doi.org/10.1007/s00170-021-07718-8.

9. Karnaukh S. G., Markov O. E. , Aliieva L. I. et al. Designing and researching of the equipment for cutting by breaking of rolled stock. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. T. 109. Issue 9-12. 2020. P. 2457–2464. https://doi.org/10.1007/s00170-020-05824-7.

10. Solovcov S. S. Bezothodnaya razrezka sortovogo prokata v shtampah. Moskva: Mashinostroenie. 1985. 176 p. (*in Russian*).

11. Lisunets N. L. Usage of physical and mathematical simulation for improvement of the processes of metal shear cutting. *CIS Iron and Steel Review*. № 17(2019). P. 34–38.

12. Finkel V. M., Golovin Yu. I., Rodyukov G. B. Holodnaya lomka prokata. Moskva: Metallurgiya. 1982. 192 p. (*in Russian*).

13. Karnaukh S. G. Studying the process of static-dynamic loading of a preform according to the scheme of three-point breaking by bending in press-hammers. *Kuznechno-Shtampovochnoe Proizvodstvo (Obrabotka Metallov Davleniem).* № 2 (2001). P. 8–12.

14. Karnaukh S. G., Markov O. E., Kukhar V. V. et al. Research of the rolled stock separating into workpieces using breaking by bending with dynamic and static-dynamic force. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.* Vol. 120 (2022). P. 2763–2776. https://doi.org/10.1007/s00170-022-08902-0.

15. Karnaukh S., Karnaukh D. Research of the influence of deformation speed on energy and power adjectives of the process of three-point cold bend breaking and on alignment integrity of raw parts. *Metallurgical and Mining Industry. № 3(7)*. 2011. P. 107–114.

16. Karnaukh S.G., Markov O.E., Kukhar V.V. et al. Classification of steels according to their sensitivity to fracture using a synergetic model. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. Vol.119 (2022). P. 5277–5287. https://doi.org/10.1007/s00170-022-08653-y.

Карнаух С. Г. Підвищення якості заготовок, отриманих способом ломки згином при статико-динамічному навантаженні на прес-молоті

З усіх способів поділу сортового прокату на мірні заготовки, що застосовуються у сучасних заготівельних виробництвах, найбільш продуктивними та економічними є безвідходні способи поділу сортового прокату: відрізка зсувом та холодна ломка згином. Метою роботи є підвищення якості заготовок способом ломки прокату шляхом дослідження процесу розділення при статико-динамічному навантаженні на прес-молоті. Комбіноване статико-динамічне навантаження при холодній ломці згином дозволяє знизити високочастотні коливання системи «інструмент – зразок – опори», виключити порушення контакту зразка з опорами, зменшити пікові величини сил з боку бойка та опор. Наявність статичної сили в момент удару забезпечує певний вихідний рівень напружень розтягання в зоні концентратора напружень, що підвищує керованість тріщиною.

Передбачається, що руйнівна тріщина при цьому завжди буде поширюватися в області напружень розтягання, що підвищує якість заготовок. Більш відчутне підвищення якості заготовок виявлятиметься при поділі зразків великих поперечних перерізів. Реактивні сили з боку опор від дії статичної сили збігаються з напрямком інерційних сил половинок зразка та додатково доламують зразок. При цьому зі збільшенням довжини зразка зменшується величина його відриву від опор у початковій фазі навантаження, що позитивно позначається на якості заготовок. Результати експериментів показують, що величина статичної сили, необхідна для виключення відриву зразка від опор, залежить від жорсткості контакту баби з проміжним пуансоном і збільшується зі зростанням останньої. Величину жорсткості контакту баби з проміжним пуансоном слід вибирати оптимальною з допомогою спеціальної конструкції пуансона. Експериментально встановлено, що величина попередньої статичної сили має бути не менше 40% від сили, за якої відбувається руйнування зразка. Аналіз геометричної точності заготовок дозволив зробити висновок про те, що з підвищенням швидкості деформування якість заготовок поліпшується. Але найбільш висока якість заготовок, що розділяються, спостерігається при статико-динамічному навантаженні. Отримані результати можуть бути використані для вдосконалення технології процесу поділу сортового прокату на мірні заготівлі способом холодного зламування ломки.

Ключові слова: *заготовка, прокат, холодна ломка згином, статико-динамічне навантаження, жорсткість, якість, собівартість.*

Karnaukh S. G. Improving the quality of workpieces obtained by breaking by bending under static-dynamic loading on a press hammer

Of all the methods for separating rolled workpieces into dimensional blanks used in modern blank production, the most productive and economical are the waste-free methods for separating workpieces: shear cutting and cold bending. The aim of the work is to improve the quality of workpieces by breaking rolled products by studying the separation process under static-dynamic loading on a press hammer. Combined static-dynamic loading during cold breaking by bending makes it possible to reduce the high-frequency vibrations of the «tool-sample-supports» system, eliminate the violation of the contact of the sample with the supports, and reduce the peak forces from the striker and supports. The presence of a static force at the moment of impact provides a certain initial level of tensile stresses in the stress concentrator zone, which increases the controllability of the crack. It is assumed that the destructive crack will always propagate in the area of tensile stresses, which improves the quality of the workpieces to be separated. A more tangible improvement in the quality of blanks will be manifested when separating samples of large cross sections. The reactive forces from the side of the supports from the action of the static force coincide with the direction of the inertial forces of the halves of the sample and additionally break the sample. In this case, with an increase in the length of the sample, the value of its separation from the supports in the initial phase of loading decreases, which has a positive effect on the quality of the resulting workpieces. The results of the experiments show that the value of the static force required to prevent the sample from being separated from the supports depends on the stiffness of the contact of the female with the intermediate punch and increases with the increase in the stiffness of the contact of the female with the intermediate punch. The value of the stiffness of the contact of the head hammer with the intermediate punch should be chosen optimal due to the special design of the punch. It has been experimentally established that the value of the preliminary static force must be at least 40% of the force at which the sample is destroyed. An analysis of the geometric accuracy of the workpieces made it possible to conclude that with an increase in the rate of deformation, the quality of the workpieces improves. But the highest quality of the separated workpieces is observed under static-dynamic loading. The results obtained can be used to improve the technology of the process of separating rolled workpieces into cut-to-length blanks by cold breaking by bending.

Key words: *workpiece, rolled metal, cold bending, static-dynamic loading, stiffness, quality, prime cost.*

Карнаух Сергій Григорович – канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрою ДДМА
Карнаух Сергей Григорьевич – канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой ДГМА
Karnaukh Sergii – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, head of department of the DSEA
E-mail: karnaukh.sergii@gmail.com.
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2878-4065

ДДМА – Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ
ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск
DSEA – Donbass State Engineering Academy, Kramatorsk

Стаття надійшла до редакції 15.03.22 р.

УДК 621.77: 621.31: 621.771.014 DOI: 10.37142/2076-2151/2022-1(51)134

Кухар В. В.
Горностай В. М.
Курпе О. Г.

ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ ТА ВИТРАТИ ЕМУЛЬСОЛУ ПРИ ХОЛОДНІЙ ПРОКАТЦІ СМУГ З ВУГЛЕЦЕВОЇ СТАЛІ НА БЕЗПЕРЕРВНОМУ 4-Х КЛІТЬОВОМУ СТАНІ 1680

У роботі виконане порівняння споживання електроенергії при холодній прокатці на безперервному 4-х клітьовому стані тандем 1680 для сортаменту з вуглецевих сталей із використанням мастильно-охолоджуючих емульсолів «Quakerol» та «Універсал 1ТС». Об'єктом дослідження був процес виробництва холоднокатаних штаб у цеху холодної прокатки. Предметом дослідження стали закономірності впливу технологічних умов виготовлення холоднокатаних штаб на чотирьох клітьовому стані 1680 з використанням емульсолів «Quakerol» та «Универсал-1ТС» на енергосилові параметри прокатки. Виявлено, що середнє сумарне навантаження на двигуни прокатних клітей і моталку при використанні емульсії "Quakerol" на 4,19 % вище, ніж при виробництві такого ж сортаменту, прокатаного на емульсії з "Універсал-1ТС". Показано, що сумарні питомі витрати електроенергії при прокатці на емульсії, приготованій з дослідного емульсолу «Quakerol», більше на 2,7 %, ніж при прокатці на емульсії, приготованій з серійного емульсолу «Універсал-1ТС». Обґрунтоване припущення, що більш висока питома витрата електроенергії при експлуатації мастильно-охолоджувальної рідини з дослідного емульсолу, що має більш високе число омилення, може бути причиною невірно вибраної і заниженої концентрації емульсії з метою зниження витрати емульсолу на процес прокатки. Встановлено, що загальні витрати емульсолу «Quakerol» склали 0,151 кг/т прокату, при чому виявлено, що тривалість використання до заміни дослідної емульсії «Quakerol» у 2,17 рази більше, ніж емульсії "Універсал-1ТС".

Ключові слова: *холодна прокатка, безперервний стан 1680, емульсол, енергоспоживання, питомі витрати електроенергії.*

Чотирьохклітьові безперервні чотиривалкові стани застосовують для холодної прокатки штаб та листів широкого призначення товщиною 0,6–2,5 мм, шириною 1300-1800 мм з гарячої штаби (підкату) товщиною 3-8 мм у рулонах масою 25–50 т. Довжина бочки валків 1500-2000 мм при діаметрі робочих валків 500–550 мм і опорних – 1300–1500 мм. Швидкість прокатки – щонайменше 5–12 м/с, продуктивність – від 0,6–0,8 млн. т на рік [1]. Із зарубіжного сучасного досвіду в області станів холодної прокатки слід відзначити насамперед широке застосування станів з чотиривалковими клітями тандемного типу у складі чотирьох та п'яти клітей для виробництва смуг і п'яти та шести клітей для виробництва жерсті [2, 3].

Підвищення конкурентоспроможності та виробітки продукції цеху холодної прокатки (ЦХП) досягають використанням сучасних емульсій, які забезпечують належний рівень показників якості холоднокатаних рулонів [4–6]. Використання нового емульсолу «Quakerol» замість «Універсал-1ТС» потребує оцінки впливу цієї мастильно-охолоджувальної рідини на показники якості, технологічності й енергосилові параметри прокатки. Нові результати дозволять розробити та рекомендувати технологічні умови використання емульсолу «Quakerol» в технологіях холодної прокатки, прогнозувати показники якості та витрати емульсолу.

Об'єктом дослідження був процес виробництва холоднокатаних штаб у цеху холодної прокатки. Предметом дослідження стали закономірності впливу технологічних умов виготовлення холоднокатаних штаб на чотирьох клітьовому стані 1680 з використанням емульсолів «Quakerol» та «Универсал-1ТС» на енергосилові параметри прокатки.

У роботі [7] значну увагу приділено підвищенню енергетичної ефективності холодної прокатки на новому двох клітьовому реверсивному стані 1700 (стосовно до умов комбінату «Запоріжсталь»). Шляхом проведення розрахунків показано, що застосування емульсолів «Cold Roller» та «Агрінол ОМ» дозволить знизити розхід електроенергії при холодній прокатці штаб на 1–7 %. Умови силового навантаження на електродвигун реверсивного стану холодної прокатки 1680 розглянуто у роботі [8]. Виявлено важливість забезпечення надійності й стабільності режимів роботи електрообладнання й автоматики для досягнення високої якості та відсутності дефектів прокатки тонких холоднокатаних штаб. Причому, особливо підкреслено

необхідність проведення прокатки з емульсіями типу «Універсал-1ТС» і «Cold Roller» для досягнення пом'якшення умов експлуатації електродвигунів прокатного стану.

Дослідження [9, 10] присвячені виявленню впливу характеристик і фізико-хімічних властивостей різних емульсолів на енерговитрати безперервних станів холодної прокатки. В них визначено, що використання емульсолу з більшою кінематичною в'язкістю дозволяє в деяких випадках знизити питомі витрати електроенергії. У станах тандем режими роботи електродвигунів клітей повинні бути синхронізовані [11] з врахуванням деформаційних явищ (різні витяжки штаби по клітях, нагрівання-охолодження при прокатці тощо), що впливає на показники якості та розхід електроенергії.

Умови тертя і змащування, як правило, суттєво впливають на енергосилові режими деформації [12]. Коефіцієнт деформаційного тертя визначають різноманітними способами, серед яких для пластичної деформації найпоширенішим є осаджування заготовок з різними умовами на контакті інструмент-заготовка [13]. Дослідження [14] присвячено аналізу режимів деформації на одноклітьовому стані холодної прокатки 1500. Причому, як за рахунок зміни контактних умов, так і за рахунок варіювання натягами, розроблено енергозберігаючі режими прокатки штаб товщиною 0,4, 0,5 та 0,8 мм.

В роботі [15] представлені результати випробувань трьох прокатних емульсій: «Gerolub 3022», «Gerolub CTS 87-1» та «Gerolub 6528». Визначено, що застосування цих прокатних емульсолів дозволяє збільшити швидкість прокатки при збереженні якості поверхні виробу та зниженні енергосилових параметрів прокатки порівняно з параметрами, отриманими раніше під час використання мастил «Quakerol 683» та «Quakerol NLM 4.0». В той же час, дослідники [16] відзначають, що за час проведення ними однократних оцінок більш ефективного емульсолу, ніж «Quakerol 671», для умов ЦХП 1700 ВАТ «АМТ» не виявлено.

Метою роботи є оцінка завантаження електродвигунів та споживання електроенергії в умовах безперервного стану холодної прокатки, враховуючі перспективи застосування емульсолу «Quakerol» замість з емульсолу «Універсал-1ТС».

Для проведення дослідно-промислових випробувань було поставлено 11 $м^3$ (~9900 кг) дослідного емульсолу «Quakerol». Для визначення фактичних фізико-хімічних показників було відібрано проби емульсолу. Враховуючи те, що гарячекатаний травлений прокат може перебувати перед прокаткою у відкритому просторі не більше 48 годин, а кампанія випробувань дослідного емульсолу «Quakerol» тривала близько місяця, то розподіл дослідної плавки для порівняльного прокатування частини рулонів на серійному емульсолі «Універсал-1ТС» не виконували. Для порівняння використовували дані, отримані раніше на рулонах, прокатаних на емульсії з емульсола «Універсал-1ТС» більш ранніх поставок.

Проведено вхідний контроль відповідності характеристик емульсолу вимогам ТУ У 24.6-31709624-001:2005. Встановлено, що випробуваний зразок дослідного емульсолу «Quakerol» відповідає вимогам паспорту якості. За своїми фізико-хімічними показниками дослідний емульсол «Quakerol» відрізняється від застосовуваного емульсолу «Універсал-1ТС» тим, що має більш високі змащувальні властивості (число омилення 164,44 мгКОН/г, проти 38,57 мгКОН/г у емульсу «Універсал-1ТС»).

Безперервний чотирьох клітьовий стан 1680 є основним прокатним станом цеху холодної прокатки (ЦХП-1, ПрАТ «Запоріжсталь»). Він складається з 4-х послідовно розташованих клітей кварто, що мають у своєму складі два опорних і два робочих валка, а також допоміжного обладнання (підвідного приймального пристрою, поворотного столу, розмотувача, моталки барабанного типу та ін.). Характеристика приводу валків наведена у табл. 1.

Привід робочих валків від електродвигунів здійснюється через проміжні вали із зубчастою муфтою, шестеренні кліті та шпиндельні з'єднання. Характеристика валків наведена у табл. 2.

Для поліпшення захоплення першої кліті використовуються насічені робочі валки. У четвертій кліті також використовуються робочі валки з насіченою поверхнею для унеможливлення зварювання витків рулонів при подальшій термообробці. Для кожної марки сталі, а також кінцевого перерізу холоднокатаних смуг, розроблено режими обтиснення.

Таблиця 1

Характеристика приводу валків

№ кліті	Потужність двигуна, кВт	Число обертів якоря, об/хв	Швидкість прокатки, м/с
1	3300	110/200	2,75 - 5,0
2	3300	160/280	4,0 - 7,0
3	3300/2800	220/280	5,8 - 9,5
4	2 х 1650	200/450	5,6 - 10

Таблиця 2

Характеристика валків безперервного стану

Вид валків	Діаметр діжки, мм	Довжина діжки, мм	Маса валка, т	Тип підшипників
Робочі	510	1680	3,12	Роликові
Опорні	1300	1680	23,6	Рідинного тертя

Стан обладнаний системою подачі технологічного мастила (емульсія з концентрацією емульсолу 2–4 %), системами протизгинання робочих валків, контрольно-вимірювальною апаратурою, за допомогою якої здійснювали контролювання енергосилових параметрів прокатки та енергоспоживання.

Аналіз енергосилових параметрів прокатки. Проаналізовані режими роботи електродвигунів клітей і моталки стану "Тандем" при прокатці плавок на мастильно-охолоджувальній рідині (МОР) з дослідного емульсолу «Quakerol», промасленого емульсолом «Quakerol» і серійного емульсолу «Універсал-1ТС», промасленого маслом консервації «ОК-2». Результати аналізу навантажень при прокатці смуг перерізом 0,68х1000 мм з підкату завтовшки 3,0 мм узагальнені в табл. 3.

Таблиця 3

Середні сумарні навантаження на двигуни при прокатці

Марка сталі	Розмір	Середнє сумарне навантаження на електродвигуни клітей та моталку при прокатці одного рулону дослідної плавки, кВА	
		Прокат на емульсії з дослідного емульсолу «Quakerol»	Прокат на емульсії з емульсолу «Универсал-1ТС»
08кп	3,0/1,0 × 1265	10,965	10,505

Як видно з табл. 3, середнє сумарне навантаження на двигуни клітей і моталку 4-х клітьового стану 1680 в установленому режимі прокатки при використанні емульсії з дослідного емульсолу «Quakerol» на промасленому емульсолом «Quakerol» металі на 4,19 % вище, ніж при прокатці такого ж сортаменту, промасленого в БТА-4 маслом ОК-2 і прокатаного на емульсії з «Універсал-1ТС».

Аналіз спожитої електроенергії. Проаналізовано споживання електроенергії при прокатці однотипного сортаменту при прокатці плавок на МОР з дослідного емульсолу «Quakerol», промасленого емульсолом «Quakerol» і серійного емульсолу «Універсал-1ТС», промасленого маслом консервації «ОК-2». Дані про спожиту електроенергію представлені в табл. 4.

Як видно з табл. 4, сумарна питома витрата електроенергії при прокатці на емульсії, приготованій з дослідного емульсолу «Quakerol» дещо більша (на 2,7 %), ніж витрата при прокатці на емульсії, приготованій з серійного емульсолу «Універсал-1ТС». При цьому середня концентрація емульсії при прокатці рулонів на емульсолі «Quakerol» складала 1,9 % проти 3,0 % на рулонах, прокатаних на МОР, приготованою з серійного емульсолу «Універсал-1ТС». Більш висока питома витрата електроенергії при експлуатації МОР з дослідного емульсолу, що має більш високе число омилення, може бути причиною невірно вибраної і заниженої концентрації емульсії з метою зниження витрати емульсолу на прокат.

Витрата емульсолу. Тривалість роботи дослідної емульсії «Quakerol» при випробуваннях склала 521 годину проти 240 годин згідно технологічним інструкціям (у 2,17 рази більше, ніж для емульсолу «Універсал-1ТС»). Випробування були зупинені унаслідок повного вироблення дослідного емульсолу. Дослідний емульсол використовувався як для промаслення гарячекатаних смуг в лінії безперервно-травильного агрегату (БТА-4), так і для приготування прокатної емульсії. Окрім цього, 200 кг емульсолу витрачені на приготування збідненої емульсії (концентрація – 0,5 %) для промивання емульсивної системи стану Тандем.

Таблиця 4

Споживання електроенергії при прокатці на стані тандем

Розмір штаб, мм	Кількість рулонів, шт	Концентрація емульсії при прокатці, %	Розходування електро-енергії, КВт×год	Маса рулонів, т	Питомий розхід електро-енергії, КВт×год/т	Сумарний розхід електро-енергії при прокатці, КВт×год/т
«Quakerol»						
0,5×1000	10	1,5	9063,9	98	92,49	504
1,5×1250	4	1,8	1746,9	53,06	32,92	
0,5×1000	13	1,9	12852	143,16	89,77	
1,5×1250	9	1,8	4236,3	117,23	36,14	
0,5×1000	6	1,7	5595,3	68,13	82,13	
1,5×1250	9	2	3919,5	113,76	34,45	
0,5×1000	5	2,4	5344,2	56,89	93,94	
1,5×1250	10	2	4609,8	109,75	42,00	
Середне значення концентрації емульсії		1,9				
«Універсал-1ТС»						
0,5×1000	4	3,1	3800,7	44,21	85,97	490
1,5×1250	4	2,6	1693,8	54,74	30,94	
0,5×1000	7	3,8	6930,9	78,58	88,20	
1,5×1250	8	3	3631,5	93,95	38,65	
0,5×1000	9	2,7	8404,2	101,23	83,02	
1,5×1250	11	3,3	4701,6	147,54	31,87	
0,5×1000	9	2,2	9208,8	96,94	94,99	
1,5×1250	6	3	2781,9	76,58	36,33	
Середне значення концентрації емульсії		3,0				

За перший період випробувань було промаслено емульсолом «Quakerol» 40918,38 т гарячекатаного металу. За вказаний період витрачено 3600 кг емульсолу. Витрата емульсолу склала: 3600 / 40918,38 = 0,088 кг/т (при нормі для «ОК-2» – 0,1 кг/т). Протягом 12 днів був другий період, коли прокат не промаслювався, що призводило до збільшення витрат емульсолу на прокатному стані, відповідно для розрахунку загальної витрати емульсолу приймаємо витрату емульсолу на промаслення рівним 3600 / 64165 = 0,056 кг/т.

Всього за два періоди випробувань було прокатано 64165,73 т (у тому числі: 1932,15 т нагартованих рулонів, 1115,7 т для подальшого виготовлення жерсті, 61117,88 т для подальшого виготовлення холоднокатаних рулонів і листів). Для прокатки холоднокатаного прокату на стані витрачено 6300 кг емульсолу. Питома витрата емульсолу склала: 6300 кг / 64165,73 = 0,095 кг/т (норма 0,45 кг/т для емульсолу «Універсал-1ТС»). Загальна витрата емульсолу склала: 0,056 + 0,095 = 0,151 кг/т прокату.

ВИСНОВКИ

Розроблено методики оцінки енергосилових параметрів при холодній прокатці з емульсолами. Встановлені закономірності впливу технологічних умов прокатки на 4-х клітьовому стані з використанням емульсолу «Quakerol» на енергосилові параметри прокатки. Виявлено, що середнє сумарне навантаження на двигуни клітей і моталку 4-х клітьового стану 1680 в установленому режимі прокатки при використанні емульсії «Quakerol» на 4,19 % вище, ніж при прокатці такого ж сортаменту, прокатаного на емульсії з "Універсал-1ТС". Встановлено рівень енергосилових витрат при прокатці у 4-х клітьовому стані з використанням емульсорів «Quakerol» та «Універсал 1ТС». Показано, що сумарні питомі витрати електроенергії при прокатці на емульсії, приготованій з дослідного емульсолу «Quakerol», більше на 2,7 %, ніж при прокатці на емульсії, приготованій з серійного емульсолу «Універсал-1ТС». Загальні витрати емульсолу «Quakerol» склали 0,151 кг/т прокату, при чому виявлено, що тривалість використання до заміни дослідної емульсії «Quakerol» у 2,17 рази більше, ніж емульсії «Універсал-1ТС».

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Василев Я.Д., Самокиш Д.М., Журавльова С.В., Пройдак Ю.С., Замогильний Р.О. Стан виробництва тонкого плоского сталевого проката у світі і тенденції розвитку штабових станів холодної прокатки. *Теорія і практика металургії.* 2019. №1. С. 15–28. DOI:https://doi.org/10.34185/tpm.1.2019.02

2. Pittner J., Simaan M. A. Optimal control of continuous tandem cold metal rolling. *2008 American Control Conference*. Seattle, Washington, USA June 11-13. 2008, pp. 2834–2839.

3. Asghar M. T., Jungers M., Khelassi A., Francken J. Tandem cold rolling mill modeling for multi-variable control synthesis. *17th IFAC Symposium on Control, Optimization and Automation in Mining, Mineral and Metal Processing*, Aug 2016. Vienna. Austria. https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01393445

4. Мазур В. Л., Качайлов А. П., Иванченко В. Г., Добронравов А. И. Повышение качества листового проката. Киев: Техника, 1979. 143 с.

5. Мазур В. Л. Производство листа с высококачественной поверхностью. Киев: Техника. 1982. 166 с.

6. Tahir M., Ståhlberg U. Environmental improvement by using a water-based synthetic lubricant in steel-strip rolling. *Preceedings of Iron and Steel Society/AIME*: *44th Mechanical Working and Steel Processing*. Orlando, USA, 2002. September 8-11.. 40, pp. 291-302.

7. Василев Я. Д., Самокиш Д. Н., Замогильный Р. А. Разработка энергосберегающих режимов деформации на новом двухклетевом реверсивном стане холодной прокатки 1700 для комбината «Запорожсталь». *Металл и лите Украины*. 2013. 7 (242). С. 8–13.

8. Kukhar V., Korenko M., St'opin V., Karmazina I., Elchaninov A., Hurkovska S., Prysiazhnyi A., Zubrytskyi V. Operation Modes of Electric Motors of Reversing Cold Rolling Mill 1680 while Rolling with Emulsions. *Modern Electrical and Energy System*. Kremenchuk, Ukraine: Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University. September 23–25. 2019, pp. 46–49. DOI:https://doi.org/10.1109/MEES.2019.8896465.

9. Кухар В. В., Кармазіна І. В., Присяжний А. Г. Вплив фізико-хімічних показників прокатної емульсії на енерговитрати безперервних станів холодної прокатки жерсті. *Проблеми трибології*. 2018. 4. С. 92–100. DOI:https://doi.org/10.31891/2079-1372-2018-90-4-92-99.

10. Василев Я. Д., Замогильный Р. О., Самокиш Д. М. Інженерна методика визначення антифрикційної ефективності емульсолів для холодної прокатки по їх фізико-хімічним властивостям. *Теорія і практика металургії*. 2018. 6. С. 15–21. DOI:https://doi.org/10.34185/tpm.6.2018.2.

11. Kurpe O., Kukhar V., Puzyr R., Burko V., Balalayeva E., Klimov E. Electric Motors Power Modes at Synchronization of Roughing Rolling Stands of Hot Strip Mill. *Proceeding of the 25th IEEE International Conference on Problems of Automated Electric Drive*. 21–25 September 2020. Ukraine. Kremenchuk. 2020, pp. 510–513. DOI:https://doi.org/10.1109/PAEP49887.2020.9240818.

12. Dykha A., Kukhar V., Artiukh V., Aleksandrovskiy M. Contact-deformation mechanism of boundary friction. *E3S Web of Conferences*. 2020. Vol. 164, pp.14004. DOI:https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016414004.

13. Kukhar V.V., Klimov E.S., Chernenko S.M., Balalayeva E.Y. Correlation of Barreling Effect with Boundary Friction Coefficient during Upsetting of Various Materials Workpieces under Processing Conditions. *Material Science Forum*. 2020. Vol. 992, pp. 751–756. DOI:https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.992.751.

14. Романюк Р. Я. Енергозберігаючі режими обтиснень для одноклітьового реверсивного стану холодної прокатки 1500 ПАТ „МОДУЛЬ". *Збірник наукових праць Дніпровського державного технічного університету.* 2016. Т. 2. 29. С. 42–48.

15. Dolmatov A.P., Morozov A.V., Usachev M.A., Shipilov V.D., Chelyadinov A.A. Testing of rolling oils made by the Henkel company on a continuous five-stand 2030 mill. *Metallurgist*. 58. 9–10, pp. 788–795.

16. Naizabekov A., Samsonov D., Krivtsova O., Lezhnev S., Talmazan V., Arbuz A. Comparative evaluation of technologic lubricants. *International Conference on Metallurgy and Materials*. *Paper presented at the METAL 2013 - 22nd. Conference Proceedings*, pp 403-407.

REFERENCES

1. Vasilev Y.D., Samokish D.M., Zhuravleva S.V., Projdak Y.S., Zamogilny R.O. State of production of thin flat rolled steel in the world and trends of development of cold rolling mills. *Theory and Practice of Metallurgy*. 2019. 1, pp. 15–28. DOI:https://doi.org/10.34185/tpm.1.2019.02. *(in Ukrainian).*

2. Pittner J., Simaan M. A. Optimal control of continuous tandem cold metal rolling. *2008 American Control Conference.* Seattle. Washington. USA. 2008. June 11-13, pp. 2834–2839.

3. Asghar M. T., Jungers M., Khelassi A., Francken J. Tandem cold rolling mill modeling for multi-variable control synthesis. *17th IFAC Symposium on Control, Optimization and Automation in Mining, Mineral and Metal Processing*, Aug 2016. Vienna, Austria. https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01393445

4. Mazur V. L. L., Kachaylov A. P., Ivanchenko V. G., Dobronravov A. I. Improvement of quality of sheet rolling. Kiev: Tehnika. 1979. 143 p. *(in Russian).*

5. Mazur V. L. L. Sheet production with high quality surface. Kiev: Technique. 1982. 166 pp. *(in Russian).*

6. Tahir M., Ståhlberg U., Environmental improvement by using a water-based synthetic lubricant in steel-strip rolling. *Preceedings of Iron and Steel Society/AIME*: *44th Mechanical Working and Steel Processing.* Orlando. USA. 2002. September 8 – 11. Volume 40, pp. 291-302.

7. Vasilev Y. D. D., Samokish D. N., Zamogilny R. A. Development of energy-saving deformation modes at the new two-stand reversing mill 1700 for Zaporizhstal plant. Metal and cfsting of Ukraine. 2013. № 7 (242), pp. 8–13. *(in Russian).*

8. Kukhar V., Korenko M., Stopin V., Karmazina I., Elchaninov A., Hurkovska S., Prysiazhnyi A., Zubrytskyi V. Operation Modes of Electric Motors of Reversing Cold Rolling Mill 1680 while Rolling with Emulsions. *Modern Electrical and Energy System*. Kremenchuk, Ukraine: Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University. 2019. September 23–25, pp. 46–49. DOI:https://doi.org/10.1109/MEES.2019.8896465.

9. Kukhar V. V., Karmazina I. V., Prysyazhnyj A.G. Influence of physical and chemical indices of rolling momentum on energy consumption of continuous cold rolling mill. *Problems of tribology.* 2018. 4, pp. 92–100. DOI:https://doi.org/10.31891/2079-1372-2018-90-4-92-99. *(in Ukrainian).*

10. Vasilev Y. D. D., Zamogilny R.O., Samokish D.M. Ingenious method of specifying the antifriction effectiveness of cold rolling resins according to their physical and chemical properties. *Theory and practice of metallurgy*. 2018. 6, pp. 15–21. DOI:https://doi.org/10.34185/tpm.6.2018.2. *(in Ukrainian).*

11. Kurpe O., Kukhar V., Puzyr R., Burko V., Balalayeva E., Klimov E. Electric Motors Power Modes at Synchronization of Roughing Rolling Stands of Hot Strip Mill. *Proceeding of the 25th IEEE International Conference on Problems of Automated Electric Drive*. 21–25 September 2020. Ukraine. Kremenchuk. 2020, pp. 510–513. DOI:https://doi.org/10.1109/PAEP49887.2020.9240818.

12. Dykha A., Kukhar V., Artiukh V., Aleksandrovskiy M. Contact-deformation mechanism of boundary friction. *E3S Web of Conferences*. 2020. Vol. 164, pp.14004. DOI:https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016414004.

13. Kukhar V.V., Klimov E.S., Chernenko S.M., Balalayeva E.Y. Correlation of Barreling Effect with Boundary Friction Coefficient during Upsetting of Various Materials Workpieces under Processing Conditions. *Material Science Forum*. 2020. Vol. 992, pp. 751–756. DOI:https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.992.751.

14. Romanjuk R.Y. Energy-saving modes of friction for single-plate reversing cold rolling mill 1500 of PAT "MODUL". *Collection of scientific works of Dnipropetrovsk State Technical University.* 2016. T. 2. 29, pp. 42–48. *(in Ukrainian).*

15. Dolmatov A.P., Morozov A.V., Usachev M.A., Shipilov V.D., Chelyadinov A.A. Testing of rolling oils made by the Henkel company on a continuous five-stand 2030 mill. *Metallurgist.* 58. 9–10, pp. 788–795.

16. Naizabekov A., Samsonov D., Krivtsova O., Lezhnev S., Talmazan V., Arbuz A. Comparative evaluation of technologic lubricants. *International Conference on Metallurgy and Materials*. *Paper presented at the METAL 2013 - 22nd. Conference Proceedings*, 403-407.

Kukhar V. V., Hornostai V. M., Kurpe O. G. Energy consumption and emulsol spending during cold flat rolling of carbon steel on a continuous 4-stand mill 1680.

The paper compares energy consumption during cold rolling on a 4-stand mill 1680 of carbon steel assortment using "Quakerol" and "Universal-1TS" lubricating-cooling emulsols. The object of the study was the manufactury process for cold rolled strips in the cold rolling shop. The subject of the study were regularities of the technological conditions influence for cold rolled strips production on a four-stand mill 1680 with the use of "Quakerol" and "Universal-1TS" emulsions on the rolling energy and power parameters. It was found that the average total load on mill's stands motors and winder when using "Quakerol" emulsion is on 4.19% higher than when rolling the same assortment rolled with emulsion from "Universal-1TS". It is shown that the total specific consumption of electricity when rolling on an emulsion prepared from the experimental "Quakerol" emulsol is 2.7% more than rolling on an emulsion prepared from the serial "Universal-1TS" emulsol. The assumption is substantiated that higher specific power consumption in the operation of lubricant-coolant from experimental emulsols, which has a higher saponification number, can be the cause of incorrectly selected and emulsion underestimated concentration in order to reduce the emulsol consumption for the rolling process. It was established that the total consumption of the "Quakerol" emulsion was 0.151 kg/t of rolled product, and it was found that the duration of use before replacement of the experimental emulsion "Quakerol" is in 2.17 times more than that of the "Universal-1TS" emulsion.

Key words: *cold rolling, 1680 continuous mill, emulsol, energy consumption, specific consumption of electricity*

Кухарь В. В., Горностай В. Н., Курпе А. Г. Энергопотребление и расход эмульсола при холодной прокатки полос из углеродистой стали на непрерывном 4-х клетевом стане 1680.

В работе проведено сравнение потребления электрической энергии при холодной прокатке на непрерывном 4-х клетевом стане тандем 1680 для сортамента из углеродистых сталей с использованием смазочно-охлаждающих эмульсолов «Quakerol» и «Универсал 1ТС». Объектом исследования был процесс производства холоднокатаных полос в цехе холодной прокатки. Предметом исследования стали закономерности влияния технологических условий изготовления холоднокатаных полос на четырех клетьевом стане 1680 с использованием эмульсолов «Quakerol» и «Универсал-1ТС» на энергосиловые параметры прокатки. Выявлено, что средняя суммарная нагрузка на двигатели прокатных клетей и моталку при использовании эмульсии Quakerol на 4,19 % выше, чем при производстве такого же сортамента, прокатанного с использованием эмульсии Универсал-1ТС. Показано, что суммарный удельный расход электроэнергии при прокатке на эмульсии, приготовленной из опытного эмульсола «Quakerol», больше на 2,7 %, чем при прокатке на эмульсии, приготовленной из серийного эмульсола «Универсал-1ТС». Обосновано предположение, что более высокий удельный расход электроэнергии при эксплуатации смазочно-охлаждающей жидкости из опытного эмульсола, имеющего более высокое число омыления, может быть причиной неверно выбранной и заниженной концентрации эмульсии с целью снижения расхода эмульсола на процесс прокатки. Установлено, что общие расходы эмульсола «Quakerol» составили 0,151 кг/т проката, причем обнаружено, что продолжительность использования до замены опытной эмульсии «Quakerol» в 2,17 раза больше, чем эмульсии "Универсал-1ТС".

Ключевые слова: *холодная прокатка, непрерывный прокатный стан 1680, эмульсол, энергопотребление, удельный расход электроэнергии.*

Кухар Володимир Валентинович – д-р техн. наук, професор, проректор з науково-дослідної роботи, ТОВ «Технічний університет «Метінвест Політехніка»
Kukhar Volodymyr – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, vice-rector for R&D work, "Metinvest Polytechnic Technical University" LLC
Кухарь Владимир Валентинович – д-р техн. наук, профессор, проректор по научно-исследовательской роботе, ООО «Технический университет «Метинвест Политехника»
E-mail: kvv.mariupol@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4863-7233

Горностай Вадим Миколайович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри технології виробництва літальних апаратів НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського»
Hornostai Vadym – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute
Горностай Вадим Николаевич – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры технологии изготовления летательный аппаратов НТУУ «КПИ им. И. Сикорского
E-mail: w.gornostay@kpi.ua
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5766-931X

Курпе Олександр Геннадійович – д-р техн. наук, керівник групи холодного прокату, ТОВ «Метінвест Інжинірінг»
Kurpe Oleksandr – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, head of the cold rolling group, "Metinvest Engineering" LLC
Курпе Александр Геннадиевич – д-р техн. наук, руководитель группы холодного проката, ООО «Метинвест Инжиниринг»
E-mail: aleksandr.kurpe@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2039-7239

ТОВ «Технічний університет «Метінвест Політехніка», м. Запоріжжя
"Metinvest Polytechnic Technical University" LLC, Zaporizhzhia
ООО «Технический университет «Метинвест Политехника», м. Запорожье

НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського» – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute – National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine.
НТУУ «КПИ им. И. Сикорского – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», г. Киев, Украина.

"Metinvest Engineering" LLC, Dnipro
ООО «Метинвест Инжиниринг», г. Днепр
ТОВ «Метінвест Інжинірінг», м. Дніпро

Статья поступила в редакцию 21.05.2022 г.

УДК 621.771.23 DOI: 10.37142/2076-2151/2022-1(51)141

Kulik T. A.

INVESTIGATION OF THE TEMPERATURE FACTOR ON THE FORMATION OF A STRIP SURFACE MICRO-RELIEF DURING WARM ROLLING

The temperature is studied as a factor that affects the formation of the micro-relief of the strip, which was rolled with heat. Various schemes for heating the strip to the required temperature are considered. A mathematical model of the temperature distribution over the thickness of the strip and along the length of the deformation zone is obtained. The temperature distribution along the height and length of the deformation zone is not the same. Our studies have shown that the heating scheme is better when the heater is inside the roll. This is better because it gives a smaller temperature spread along the length of the deformation zone. That is, you can better use temperature as a factor. The roughness of the strip during warm rolling is influenced by several factors. If we consider the process with the final tempering, then one of the main factors is temperature. We studied how temperature affects the printability coefficient of the micro-relief from rolls to metal. Experiments were carried out to confirm the results. The experiment consisted in indentation a single indenter into a metal sample. Indenters of various shapes were used, similar to the shape of single micro-protrusions of the real relief of the work rolls. The sample was heated to different temperatures in the drying box, then the depth of its indentation was measured. Experimental studies have shown an almost linear dependence of the penetration depth on temperature, that is, the dependence of the printability coefficient on temperature. This form of dependence was observed for all forms of the indenter, although with different intensity. So, we can confidently say that the temperature factor can be used to control the parameters of the strip roughness that is needed. To do this, at the final stage of the technological chain of rolling, which is temper rolling, you can use the work rolls of the desired micro-relief, and the strip of the desired temperature.

Keywords: rolling, tempering, temperature, micro-relief, printability coefficient, experiment, indenter.

In modern conditions, product quality is extremely important, because it determines the development of production processes and their efficiency. In addition to other factors, the level of quality of rolled products is affected by the state of the surface, because it is the micro-relief that determines the technological features of the following technological operations, as well as the efficiency of the product operation [1]. But the most important influence the quality of the surface has on the presentation of the product [2, 3]. In particular, the micro-geometry of the surface of sheet steel strips greatly affects the quality and durability of paint coatings. It also affects the limiting degree of drawing during stamping, the reflectivity of the metal, etc. [4, 5]. In most technological schemes temper rolling is the final stage of the rolling process. Theoretical and experimental studies have shown that under certain conditions during temper rolling the roughness of the rolls is almost completely transferred to the strip [6]. That is, the micro-relief of the work rolls is printed on the strip (Fig. 1). Recently, this feature has been increasingly used to obtain the desired micro-relief to the strip.

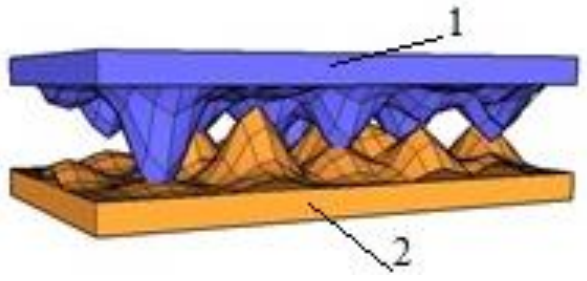


Fig. 1. Model of printability a micro-relief from a roll to a strip

The purpose of this work is to study the temperature factor, since it has a strong influence on the printability coefficient, that is, in the result, the temperature strongly affects the quality of the finished product, product which was obtained by warm rolling.

There are two approaches to implement the warm rolling process. The first involves heating the strip immediately before the deformation zone. Such a scheme is easier to implement and easier to regulate. But the results of mathematical modeling of the temperature field of the

strip showed that the temperature in the deformation zone will have a strong spread in this case [7]. The second approach involves additional heating of the metal directly in the deformation zone. This heating occurs due to the contact heat exchange between the strip and the rolls preheated to the desired temperature. This approach often requires renovation of the equipment. But the results of mathematical modeling of the temperature field of the strip show that then the temperature in the deformation zone is uniform. This gives stable mechanical properties of the metal and the possibility of predicting them [7].

When the flow sheet of warm rolling with heating inside is used, an electric heating source is placed, for example, inside the axial channel of the roll (Fig. 2).

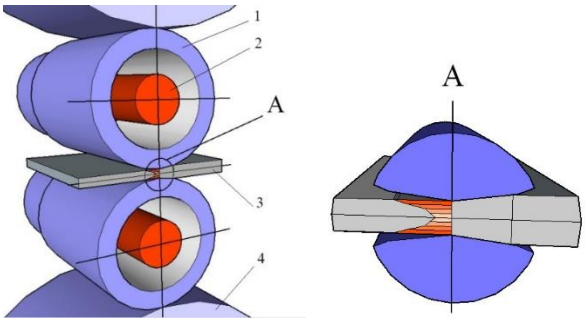


Fig. 2. Model of a roller assembly with an internal heating source

If we do not take into account the length of the arc of contact between the work roll and the strip, that is, the temperature field of the roll will be considered axisymmetric and constant in time. The temperature distribution along the radius in this case must satisfy the following differential equation:

$$\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{\partial t}{r \cdot \partial r} = 0, \quad (1)$$

where t - the temperature, r - the current work roll radius.

The final solution to this equation, as described in [4], looks like this:

$$t_b(r) = t_{en} + \frac{q_u R_o}{\alpha_b R_b} + \frac{q_u R_o}{\lambda_b} \ln \frac{R_b}{r}, \quad (2)$$

where t_b - the temperature of the roll in the current radius r, t_{en} - the environment temperature, R_b, R_o - the radii of the roll and hole respectively, q_u - the specific power of the heating source, α_b - the thermal conductivity coefficient, λ_b - the heat transfer coefficient.

Rolls and strip are cooled by heat exchange and convection with the environment, as well as by radiation. Heat transfer coefficient by radiation for surface temperature 350…400°C and environment 20°C is 2…3 W/(m^2 deg), that is, it is quite small, so it can be ignored. The proportion of heat that goes to the support rolls is about 5% of all losses. Therefore, it can also disregard separately. Knowing this, as well as the fact that the heat transfer conditions are stationary in time, we can calculate:

$$t_b(\theta) = t_{en} - t_b \cdot (\theta - \Delta\theta) \cdot e^{-\frac{\alpha_b L_K}{c_b \pi R_b^2 V_b}}, \quad (3)$$

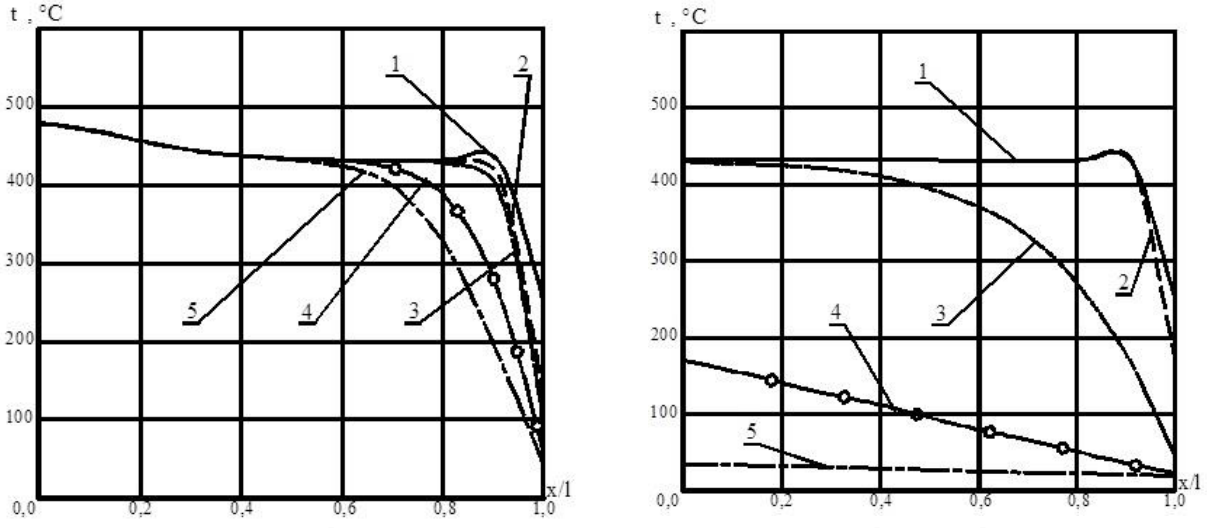
where θ, $\Delta\theta$ - the time and the increase of time, V_b - the circumferential speed of the roll, L_K - the length of the contact.

The analysis of the obtained analytical formulas was carried out on the basis of numerical mathematical models. The resulting graphical illustration of the result of such a model for heating sources, which inside and outside of the work roll, is shown in Fig. 3.

The figures show the temperature distribution of the surface layer (1) along the length of the deformation zone for different schemes. It can be seen that the temperature is more unstable with an outside source and stable with an inside one.

Consider how temperature affects the printability coefficient. The formation of the micro-relief of the strip occurs in three stages: at the previous stages of processing the strip, which form its initial roughness (zones 1-2); in the zone of contact with the work rolls (zone 3), where the formation of the roughness of the strip occurs under the influence of the indentation of the micro-

relief of the rolls; in the zone of free exit from the rolls (zones 4-5), there is a slight change in roughness due to contact with the guide rolls and the coiler (Fig. 4).



a) inside b) outside

Fig. 3. Calculated temperature distributions for different flow levels during warm rolling: (*1*- ——-$y/h_{xi} = 1{,}0$; *2*- — — ·-$y/h_{xi} = 0{,}75$; *3*--- ---$y/h_{xi} = 0{,}5$; *4* - —o—-$y/h_{xi} = 0{,}25$; *5*-— - —-$y/h_{xi} = 0{,}0$)

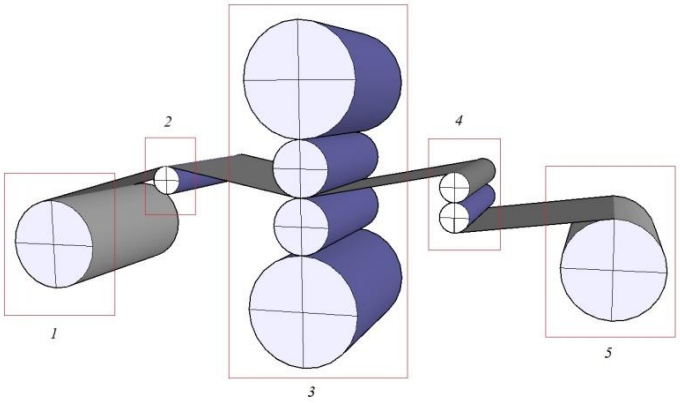


Fig. 4. Zones of surface microrelief formation (1 - decoiler; 2, 4 – zones of free surface micro-relief formation; 3 – zone of micro-relief formation in the deformation zone; 5 – coiler)

How intensively the roughness is printed from the work rolls to the strip is characterized by the printability coefficient, which is defined as:

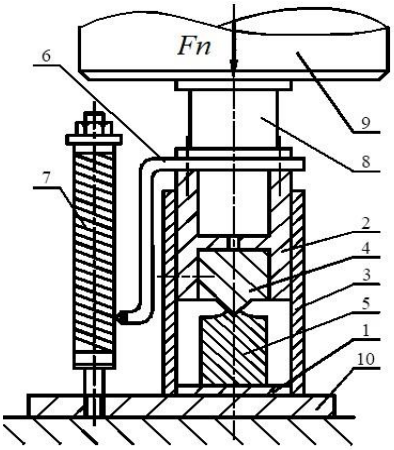
$$K_i = \frac{Ra_s}{Ra_r}, \quad (4)$$

where Ra_s - is the strip roughness index Ra, μm; Ra_r - is the roll roughness index Ra, μm.

The value of this coefficient is affected by the following factors: initial strip roughness, roll roughness, compression intensity, strip material and process temperature.

Experimental studies of the mechanism of formation of surface roughness and the factors that affect it were carried out using a special device (Fig. 5), which provides physical modeling of the process of indentation of a complex-profile indenter into a workpiece under warm rolling temperature [8].

a)



b)

Fig. 5. External view (a) and principle scheme (b) of the device for experimental study of the process of warm indentation of a complex-profile indenter into a workpiece

Structurally, this installation included a lower fixed 1 and an upper movable 2 punches, interconnected by a guide bush 3. In the upper movable punch 2, a complex-profile indenter 4 was placed, which was indentation into the workpiece 5. While a total of 12 indenters of different sizes and shapes were making (Fig. 6) with different configurations of the deforming surface. Using lever 6, the upper movable punch 2 was connected to a linear displacement sensor 7 of a rheostat type.

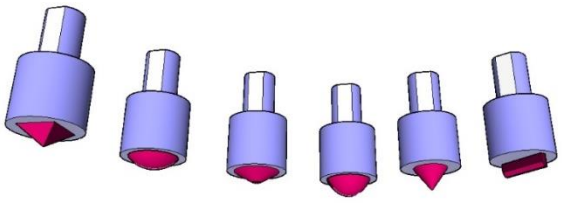


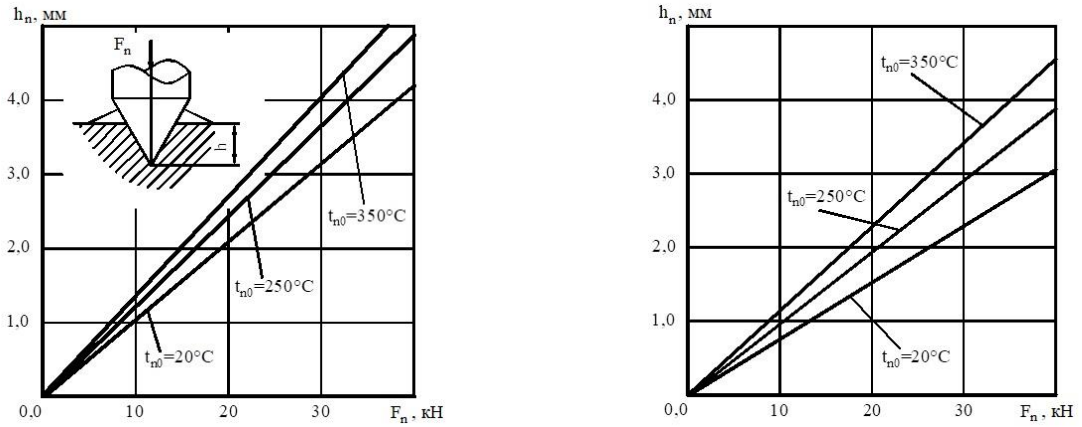
Fig. 6. Appearance and model of indenters of various types

The indentation force F_n was fixed with the help of a pressure capsule 8, connected by the end surfaces of its annular element with the upper movable punch 2 of the considered device and the power punch 9 of the hydraulic press GP 70-5278, which ensured the movement of the upper punch 2 and the creation of this force.

The entire equipment was placed on a single stand 10, which during the experiment was installed in the working space of the aforementioned hydraulic press. The sample 5 were heated to the required temperatures in a drying box immediately before their warm plastic deformation. The results obtained for sample made of steel 20 and steel 45 are shown in fig. 7.

In this case, the force of the indentation process $\boldsymbol{F_n}$, which hydraulic press was created a through a power punch 9, is considered as an argument, and the indentation depth $\boldsymbol{h_n}$, which was measured by a linear displacement sensor 7 of a rheostatic type, was taken as a function.

The results showed that with increasing force, the indentation depth of the indenter increases almost linearly. An increase, ceteris paribus, takes place in the case of an increase in the heating temperatures of the initial sample. In particular, with a force of $\boldsymbol{F_n}$ = 30 kN and an increase in temperatures from 20°C to 350°C, the indentation depth of the conical indenter increases from 3.13 mm to 4.05 mm, that is, by 29% for samples made of steel 20 and from 2.26 mm to 3.48 mm, i.e. by 54%, for steel 45.



a) steel 20 b) steel 45

Fig. 7. Empirical depth distributions $\boldsymbol{h_n}$ depending on the indentation force $\boldsymbol{F_n}$ of a pyramidal indenter into a flat sample made of steel 20 (a) and steel 45 (b), preheated to a temperature $\boldsymbol{t_{n0}}$

CONCLUSION

When using the inside heating of the work rolls, the surface of the strip is evenly heated, this shows the presented mathematical model. Several factors influence the formation of the strip micro-relief at the final stage of the technological rolling line, the main ones being temperature. An installation for investigating the effect of temperature on the printability coefficient is presented. The indentation of a single micro-roughness of the work roll into the strip was physically simulated. In the course of the experiment, the samples were heated in a drying box and indenters of various shapes were dented into them. The results showed that with increasing temperature, the indentation depth of the indenter increases almost linearly. This confirms the possibility of using temperature as a factor influencing the printability coefficient of the roughness of the work rolls. That is, the temperature makes it possible to control the surface micro-geometry parameters during warm rolling.

REFERENCES

1. Thakur S.K., Das A.K., Jha B.K. Effect of Warm Rolling Process Parameters on Microstructure and Mechanical Properties of Structural Steels. *Trans Indian Inst Met*. 2022. 75, pp. 1509–1524.

2. Jingwei Zhao, Zhengyi Jiang. Rolling of Advanced High Strength Steels: Theory, Simulation and Practice. CRC Press. 2021. 644 p.

3. Li R., Zhang Q., Zhang X. et al. Control method for steel strip roughness in Two-stand temper mill rolling. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. 2015. 28, pp. 573–579.

4. Gourhari Ghosh, Ajay Sidpara P.P. Bandyopadhyay. Understanding the role of surface roughness on the tribological performance and corrosion resistance of WC-Co coating. *Surface and Coatings Technology*. 2019. 378. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2019.125080.

5. Dekrit H. Akbar, Purnami Purnami, Sugeng Prayitno Budio. Influence of Surface Roughness and Paint Coating on Corrosion Rate. *MECHTA. International Journal of Mechanical Engineering Technologies and Applications*. 2020, pp. 15-19.

6. Ogarkov N. N. Zvyagina E.Yu., Ismagilov R. R. Theoretical analysis of formation of automobile sheet roughness during temper rolling in shot-blasted rolls. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2019. 62 (8), pp. 600-605.

7. Kulik T. A. Mathematical modeling of the temperature field of the deformation zone of a warm-rolled strip in the implementation of various schemes for its heating. *Scientific Herald of the Karaganda State Industrial University*. 2018. 3 (22), pp. 30-34. *(in Russian).*

8. Kulik T. A. Mathematical modeling of the temperature field of rolls of warm rolling mills with an inside heating source. *Scientific Herald of the Dnipro State Technical University (Technical Sciences)*. 2020. T 2 (37), pp. 53-57. *(in Ukrainian).*

Кулик Т. А. Исследование температурного фактора формирования микро-рельефа поверхности полосы при теплой прокатке

Исследован температурный фактор формирования микрорельефа полосы, полученной в результате реализации процесса теплой прокатки. Проанализированы разные схемы нагрева полосы до нужной температуры на основе полученной математической модели распределения температуры как по толщине полосы,

так и по длине очага деформации. Показано, что распределение температуры по высоте и длине очага деформации неоднородно. Причем, исследования показали, что предпочтительней схема нагрева с внутренним нагревом рабочего валка, поскольку в таком случае имеет место меньший разброс температуры по длине очага деформации, что, в свою очередь, позволяет использовать температуру как элемент влияния. Рассмотрены факторы, которые влияют на шероховатость полосы при теплой прокатке. Если рассматривать процесс с дрессировкой на финальной стадии, то одним из главных факторов является температура. Исследовано влияние температуры на коэффициент отпечатываемости микрорельефа валков на металле. Для подтверждения результатов были проведены эксперимент, который заключался в внедрении единичного индентора в образец металла. При этом использовали инденторы разной формы, имитирующие типичные формы одиночных микровыступов реального рельефа рабочих валков. В ходе эксперимента образец нагревали до различных температур в сушильном шкафу, затем измеряли глубину его внедрения. Экспериментальные исследования показали почти линейную зависимость глубины внедрения от температуры, то есть линейную зависимость коэффициента отпечатываемости от температуры. Такая зависимость наблюдалась при всех формах индентора, хотя и показана различная её интенсивность. Результаты исследований показывают возможность использования температурного фактора для получения требуемых параметров шероховатости полосы. Для этих целей финальном этапе технологической цепочки процесса прокатки, которым является дрессировка, необходимо использовать валки нужного микро-рельефа, а полосу нужной температуры.

Ключевые слова: прокатка, дрессировка, температура, микрорельеф, коэффициент отпечатываемости, эксперимент, индентор.

Кулік Т. О. Дослідження температурного фактора формування мікро-рельєфу поверхні смуги при теплій прокатці

Досліджено температурний фактор формування мікро-рельєфу смуги, отриману в результаті реалізації процеса теплої прокатки. Проаналізовано різні схеми нагрівання смуги до потрібної температури на основі отриманої математичної моделі розподілу температури як за товщиною смуги, так і за довжиною осередку деформації. Показано, що розподіл температури за висотою та довжиною осередку деформації неоднорідний. Причому дослідження показали, що краще схема нагріву з внутрішнім нагріванням робочого валка, оскільки в такому випадку має місце менший розбіг температури по довжині осередку деформації, що, у свою чергу, дозволяє використовувати температуру як фактор впливу. Розглянуто фактори, що впливають на шорсткість смуги при теплій прокатці. Якщо розглядати процес із дресируванням на фінальній стадії, то одним із головних факторів є температура. Досліджено вплив температури на коефіцієнт віддруковуваності мікрорельєфу валків на металі. Для підтвердження результатів було проведено експеримент, який полягав у впровадженні одиничного індентора у зразок металу. При цьому використовували інденторі різної форми, що імітують типові форми одиночних мікровиступів реального рельєфу робочих валків. В ході експерименту зразок нагрівали до різних температур у сушильній шафі, потім вимірювали глибину його впровадження. Експериментальні дослідження показали майже лінійну залежність глибини впровадження від температури, тобто лінійну залежність коефіцієнта віддруковуваності від температури. Така залежність спостерігалася при всіх формах індентора, хоча й показана різна її інтенсивність. Результати досліджень показують можливість використання температурного фактору для отримання необхідних параметрів шорсткості смуги. Для цього на фінальному етапі технологічного ланцюга процесу прокатки, яким є дресирування, необхідно використовувати валки потрібного мікро-рельєфу, а смугу потрібної температури.

Ключові слова: *прокатка, дресирування, температура, мікрорельєф, коефіцієнт друку, експеримент, індентор.*

Кулик Татьяна Александровна – канд техн. наук, ст. преп. ДГМА
Kulik Tetiana – Candidate of Technical Science, Senior Lecturer DSEA
Кулік Тетяна Олександрівна – канд. техн. наук, ст. викл. ДДМА
E-mail: tatyana.kullik@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5315-6138

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск
DSEA – Donbass State Engineering Academy, Kramatorsk
ДДМА – Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ

The article was received by the editors on 06.05.22.

УДК 621.771.01 DOI: 10.37142/2076-2151/2022-1(51)147

Корева В. О.

ХОЛОДНЕ ПРОКАТУВАННЯ АЛЮМІНІЄВОГО СПЛАВУ СИСТЕМИ AL-MG

Алюмінієві зварювані та термічно не зміцнювальні сплави системи Al-Mg широко використовуються в якості легких конструкційних матеріалів в різноманітних галузях промисловості. Покращення питомих міцнісних характеристик таких сплавів за рахунок холодної пластичної деформації є однією із актуальних науково-технічних проблем. Проте важливим питанням при розробці технологічних режимів пластичної формозміни алюмінієвих сплавів також є прогнозування руйнування, яке супроводжується розвитком та збільшенням кількості мікропор та мікротріщин. В роботі виконано дослідження деформаційної обробки алюмінієвого сплаву системи Al-Mg холодним прокатуванням. Чисельне моделювання процесу холодного прокатування алюмінієвого сплаву 5056 системи Al-Mg виконували методом скінченних елементів із використанням програмного комплексу для інженерного аналізу технологічних операцій обробки металів тиском DEFORM-3D. В результаті чисельного експерименту було отримано графік моментів, що виникають на валках. Також отримано розподіли напружень (інтенсивності напружень та середніх напружень в осередку деформування,) при максимальному моменті на валках та деформацій (інтенсивності деформацій та інших компонентів) в кінці деформування. Проведений аналіз накопичення пошкоджуваності, що встановлено моделюванням. В даній роботі при чисельному моделюванні пошкоджуваність металу розраховували по критерію руйнування Cockroft & Latham. Також наведені результати експериментальних досліджень, в тому числі мікроструктури, після проведеного процесу прокатування. Встановлено, що після прокатування отримуємо зерно довжиною 100…200 мкм та шириною 10…20 мкм.

Ключові слова: *алюмінієвий сплав, метод скінченних елементів, моделювання, прокатування, інтенсивність напружень, інтенсивність деформацій, середні напруження, середні деформації, крайові зони.*

Прокатування – такий вид обробки металів тиском (ОМТ), під час якого заготовка силами тертя втягується у проміжок між обертальними валками, які її пластично деформують, при цьому зменшуючи площу поперечного перерізу і збільшуючи довжину. Цей процес належить до найпродуктивніших видів обробки завдяки безперервності процесу і великій швидкості руху заготовки між валками. Цим способом обробляють приблизно 90 % витопленої на металургійних заводах сталі та понад половину кольорових металів і їх стопів [1]. На сьогодні застосування алюмінієвих сплавів є досить поширеним та має великі перспективи розвитку в подальшому. Ці сплави є основою багатьох конструкцій, використовуються в провідних галузях техніки – в авіації, ракетно-космічній і атомній техніці. Нові сплави створюють, спираючись на теоретичні відкриття й узагальнення, на результати вирішення численних технічних проблем, їх застосування зумовлює значний прогрес у різних галузях науки і техніки [2]. Алюмінієві зварювані та термічно не зміцнювальні сплави системи Al-Mg широко використовуються в якості легких конструкційних матеріалів в різноманітних галузях промисловості. Покращення питомих міцнісних характеристик таких сплавів за рахунок холодної пластичної деформації є однією із актуальних науково-технічних проблем. Раніше в роботах [3, 4] було розглянуто прокатування алюмінієвих сплавів системи Al-Mg.

Проте важливим питанням при розробці технологічних режимів пластичної формозміни алюмінієвих сплавів також є прогнозування руйнування, яке супроводжується розвитком та збільшенням кількості мікропор та мікротріщин. Їх відносний об’єм характеризує пошкоджуваність металу, яка не повинна перевищувати деякого критичного значення, так як при його перевищені відбувається втрата міцнісних характеристик виробу. На сьогодні опубліковано достатньо багато моделей, за допомого яких можна оцінювати пошкоджуваність металічних матеріалів при обробці тиском. При моделюванні процесів холодної ОМТ із використанням різноманітних сучасних програмних комплексів велике значення мають закладені в них умови руйнування. Як відмічає автор роботи [5], програмні комплекси, за рідким виключенням, задовільні в частині розрахунку руйнування металів. Програмний комплекс DEFORM-3D для прогнозування руйнування металу при пластичній деформації передбачає вибір моделі руйнування на розсуд дослідника. В даній роботі при чисельному моделюванні пошкоджуваність металу розраховували по критерію руйнування Cockroft & Latham, згідно якої [6]:

$$C = \int_0^{\bar{\varepsilon}} \frac{\sigma_{max}}{\bar{\sigma}} d\bar{\varepsilon} \quad (1)$$

де σ_{max} – максимальне головне розтягувальне напруження; $\bar{\sigma}$ – інтенсивність напружень; $\bar{\varepsilon}$ – інтенсивність деформацій; C – граничне значення показника Cockroft & Latham, що відповідає моменту руйнування матеріалу.

В роботах [7, 8] представлена методика прогнозування руйнування металу при великій пластичній деформації із використанням енергетичної моделі Cockroft & Latham, згідно якої робота елементарної розтягувальної сили, що діє на матеріальну точку тіла в процесі деформації, характеризує пошкоджуваність металу. Руйнування відбувається при досягненні роботою критичного значення.

Метою роботи є чисельне моделювання та аналіз напружено-деформованого стану і пошкоджуваності алюмінієвого сплаву системи Al-Mg при холодному прокатуванні.

Чисельне моделювання процесу холодного прокатування (рис. 1) алюмінієвого сплаву 5056 системи Al-Mg виконували методом скінченних елементів із використанням програмного комплексу для інженерного аналізу технологічних операцій обробки металів тиском DEFORM-3D. Смуга товщиною 6 мм встановлюється між валками, в результаті на виході отримуємо прокат товщиною 4 мм.

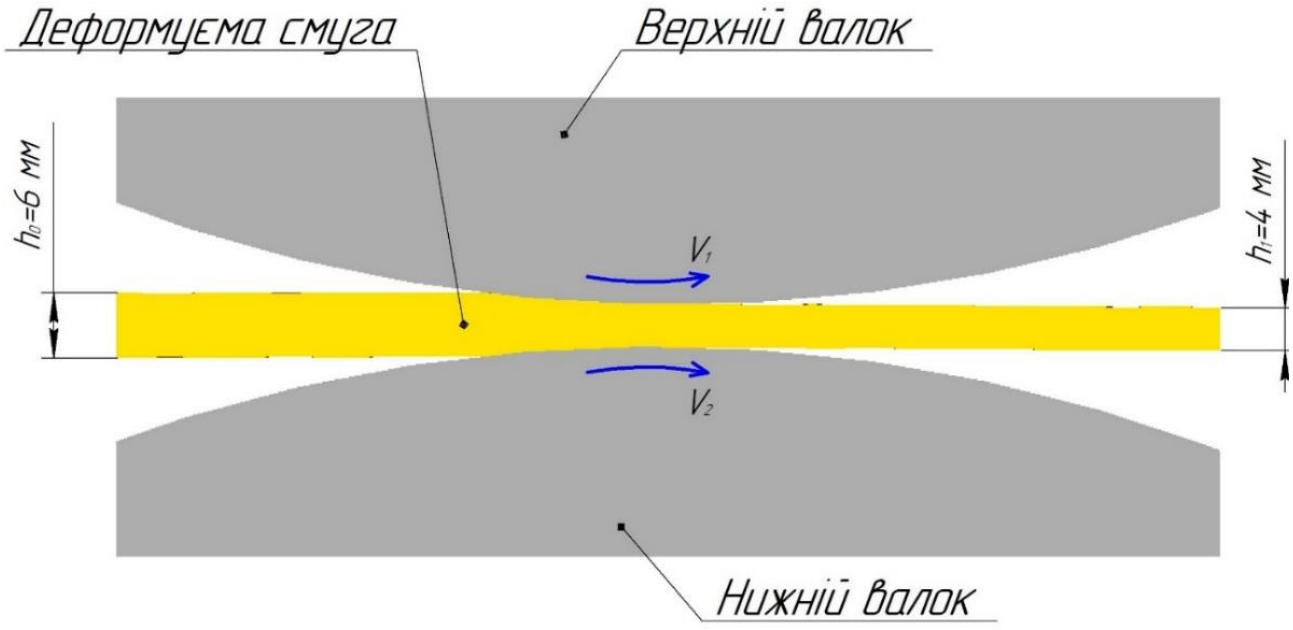


Рис. 1. Схема процесу прокатування в програмі DEFORM-3D

При моделюванні були прийняті наступні допущення: 1) деформуєма заготовка пластична; 2) робочі валки – абсолютно жорсткі; 3) закон контактного тертя – Кулона; 4) еволюцію мікроструктури не враховували.

Вихідною заготовкою для проведення чисельного моделювання першого переходу холодного прокатування була смуга товщиною 6 мм, шириною 35 мм та довжиною 170 мм, що отримана гарячим прокатуванням із пресованої штаби товщиною 12 мм. При моделюванні було задано наступні вихідні дані:

- коефіцієнт тертя по Кулону $\mu = 0{,}12$;
- кутова швидкість валків - $\omega_0 = 1{,}26$ рад/с (повний оберт валка за 5 с);
- температура заготовки та валків – 20℃;
- матеріал – AL-5056 (аналог сплаву АМг5);
- діаметр валків 300 мм.

В результаті чисельного експерименту було отримано графік моментів, що виникають на валках, який показано на рис. 2. З графіка видно, що максимальний момент становить 2200000 Н·мм (2,2 кН·м).

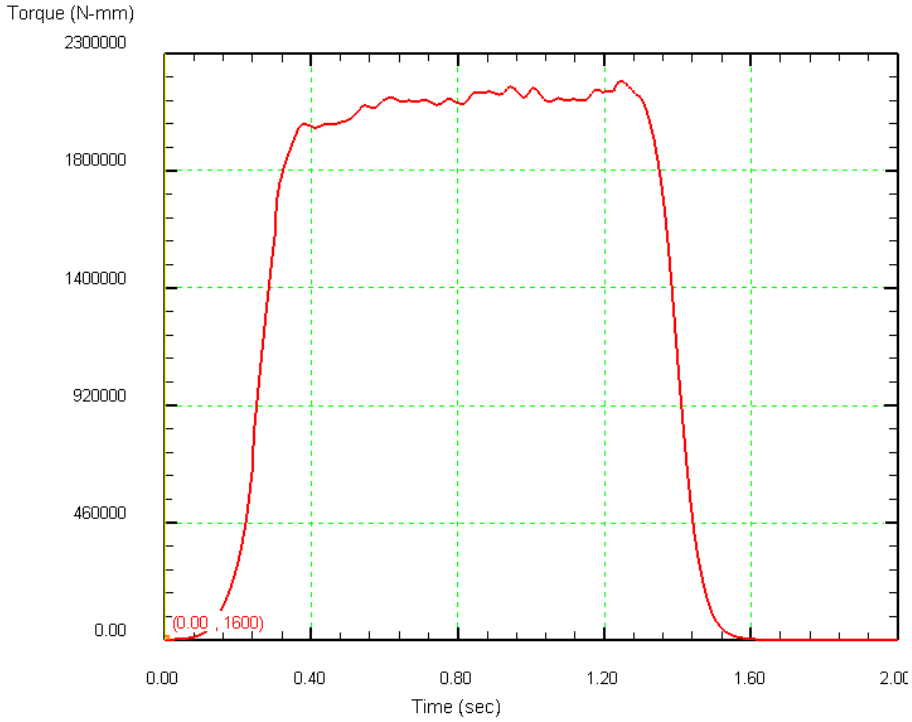
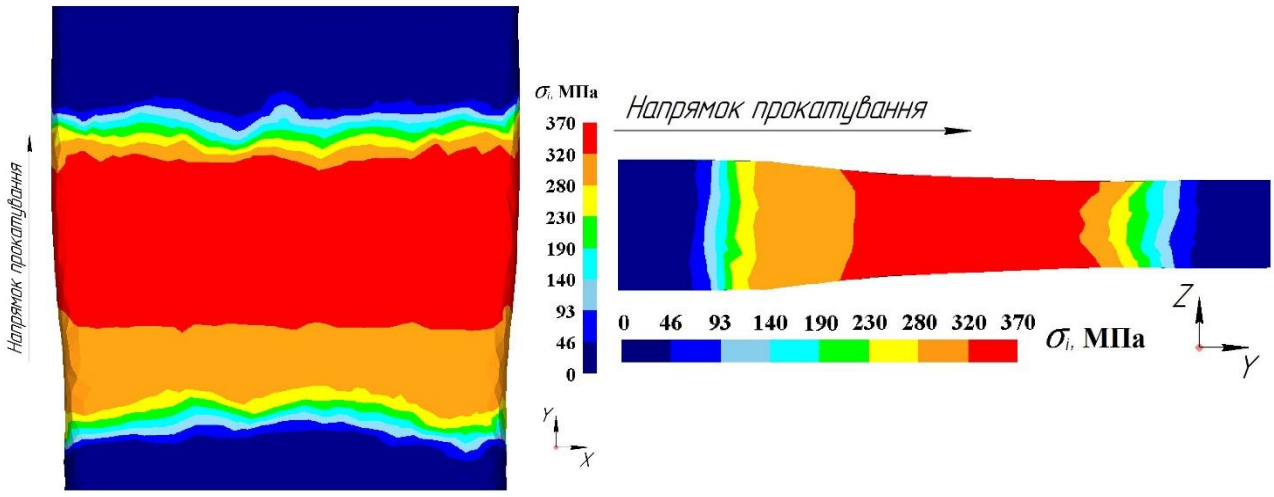


Рис. 2. Графік залежності моментів, що виникають на валках при холодному прокатуванні від часу

На рис. 3 показано розподіл інтенсивності напружень σ_i в осередку деформацій під час прокатування. Значення інтенсивності напружень становлять до $\sigma_i = 370$ МПа. По ширині смуги значення інтенсивності напружень не відрізняються.



а *б*

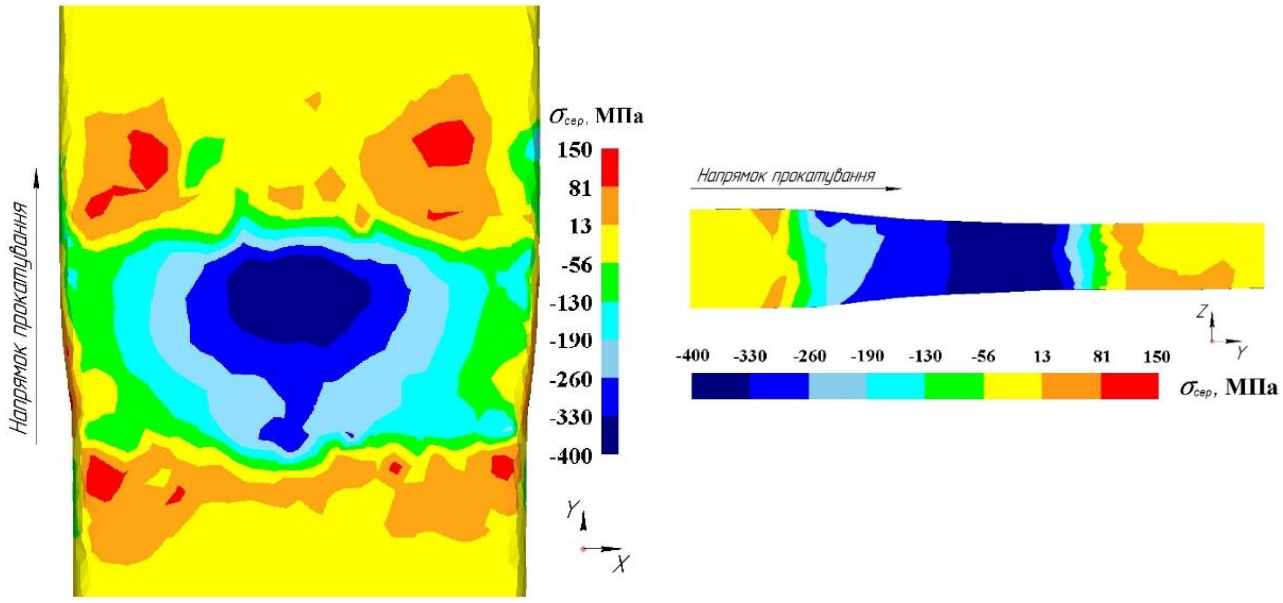
Рис. 3 Розподіл інтенсивності напружень в осередку деформацій під час прокатування:

а – на поверхні смуги в площині YX; *б* – в перерізі смуги в площині ZY

На рис. 4 показано розподіл середніх напружень $\sigma_{\text{сер}}$ в осередку деформацій під час прокатування. Їх значення знаходяться в межах $\sigma_{\text{сер}} = -400 \ldots 150$ МПа. По центру смуги в осередку деформації виникають найбільш стискаючі середні напруження

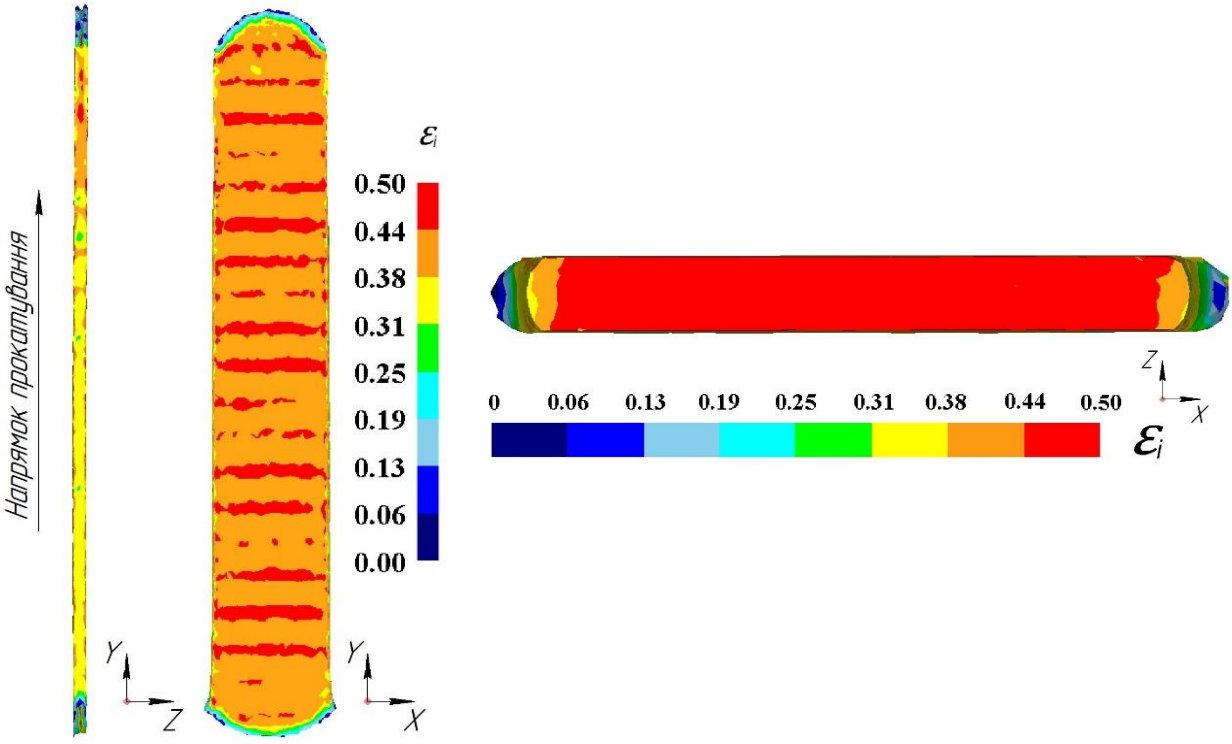
$\sigma_{\text{сер}} = -400 \ldots -260$ МПа. На вході та на виході смуги між валками виникають розтягувальні середні напруження $\sigma_{\text{сер}} = 13 \ldots 150$ МПа.

Розподіл інтенсивності деформацій по Мізесу ε_i в здеформованій смузі показано на рис. 5. Їх значення досягають величини $\varepsilon_i = 0{,}5$. Практично по всьому об'єму прокатаної смуги значення інтенсивності деформацій знаходяться в межах $\varepsilon_i = 0{,}38 \ldots 0{,}5$; на краях смуги $\varepsilon_i = 0{,}31 \ldots 0{,}38$.



а *б*

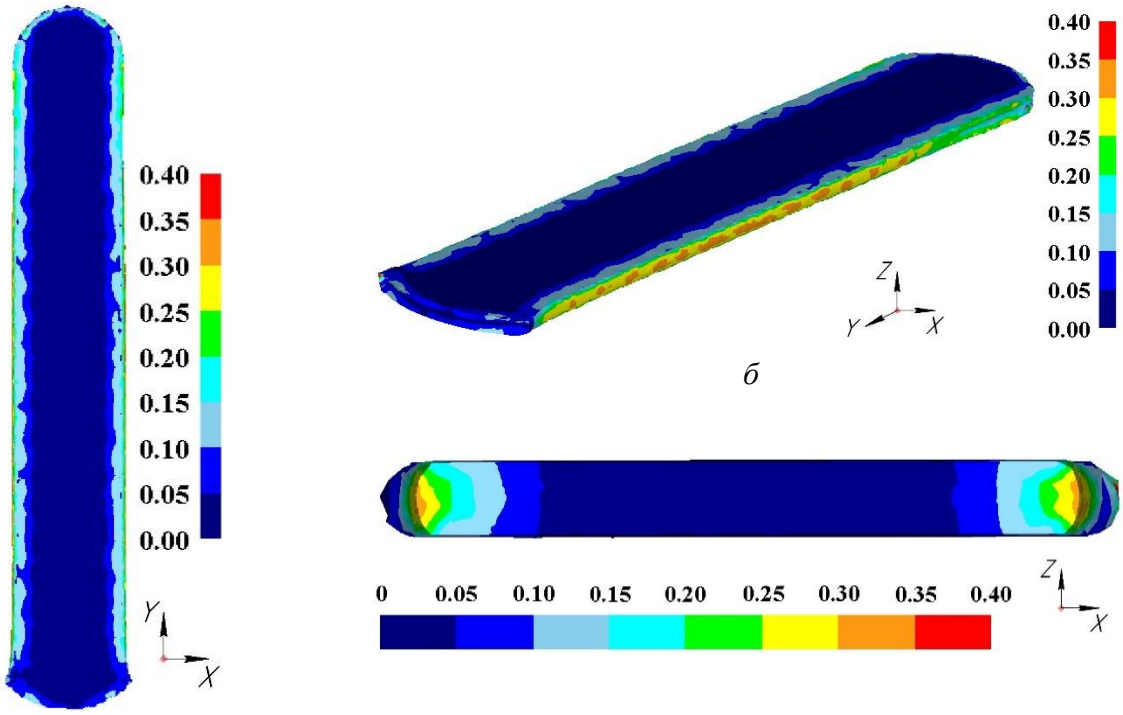
Рис. 4. Розподіл середніх напружень в осередку деформацій під час прокатування: *а* – на поверхні смуги в площині YX; *б* – в перерізі смуги в площині ZY



а *б*

Рис. 5. Розподіл інтенсивності деформацій по Мізесу в здеформованій смузі: *а* – на поверхні смуги в площині YZ та YX; *б* – в перерізі смуги в площині ZX

На рис. 6 показаний розподіл пошкоджуваності металу в здеформованій смузі після холодного прокатування. На краях смуги на глибину 2..3 мм значення пошкоджуваності досягають 0,2…0,3. В центрі ж смуги пошкоджуваність відсутня.



а *б* *в*

Рис. 6. Розподіл пошкоджуваності в здеформованій смузі:
а – на поверхні смуги в площині YX; *б* – на поверхні смуги в ізометрії; *в* – в перерізі смуги в площині ZX

На рис. 7 показано прокатані смуги товщиною 4 мм, що отримані в результаті експериментальних досліджень, а також мікроструктура в поперечному перерізі смуги. Після прокатування отримуємо зерно довжиною 100…200 мкм та шириною 10…20 мкм.

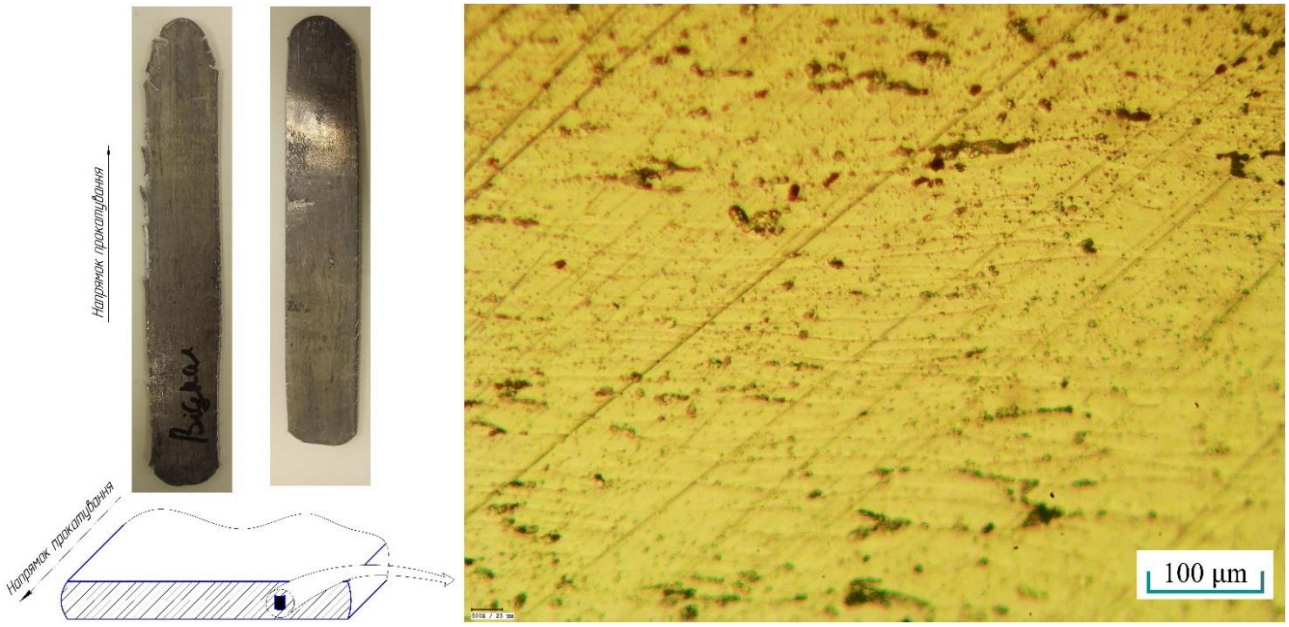


Рис. 7. Результати експериментальних досліджень холодного прокатування смуг та мікроструктура в поперечному перерізі

ВИСНОВКИ

В роботі виконано дослідження деформаційної обробки алюмінієвого сплаву 5056 системи Al-Mg холодним прокатуванням. В результаті чисельного експерименту було отримано графік моментів, що виникають на валках. Також отримано розподіли інтенсивності напружень та середніх напружень в осередку деформування при максимальному моменті на валках та інтенсивності деформацій по Мізесу в кінці деформування. Проведений аналіз накопичення пошкоджуваності, що встановлено моделюванням. При чисельному моделюванні пошкоджуваність металу розраховували по критерію руйнування Cockroft & Latham. Також наведені результати експериментальних досліджень, в тому числі мікроструктури, після проведеного процесу прокатування. Встановлено, що після прокатування отримуємо зерно довжиною 100…200 мкм та шириною 10…20 мкм.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ерисов Я. А., Гречников Ф.В., Гречникова А.Ф. Исследование влияния режимов прокатки и термообработки на структуру и свойства листов из алюминий-литиевого сплава В-1461. *Известия Самарского научного центра РАН.* 2019. 5. С. 5–10.

2. Калініна Н.Є., Бондаренко О.В. Використання алюмінієвих сплавів в авіаційній та ракетно-космічній техніці: навч. посіб. Дніпро: РВВ ДНУ. 2011. 64 с.

3. Bintu A., Vincze G., Picu R.C., Lopes A.B. Effect of symmetric and asymmetric rolling on the mechanical properties of AA5182. *Mater. Des*. 2016. 100, pp. 151 – 156.

4. Gogaev K.A., Voropaev V.S., Podrezov Yu.N., Verbilo D.G., Koryak O.S. Effect of deformation conditions on the properties of powder material AMg5. *Powder Metall. Metal Ceram*. 2015. 54 (5-6), pp. 274 – 280.

5. Колмогоров В.Л. Численное моделирование больших пластических деформаций и разрушения металлов. *Кузнечно-штамповочное производство*. 2003. 2. С. 4 – 16.

6. Cockcroft M. G., Latham D.J. Ductility and Workability of metals. *J. Inst. Metals*. 1968. 96, pp. 33 – 39.

7. Боткин А.В., Валиев Р.З. и др. Оценка поврежденности металла при холодной пластической деформации с использованием модели разрушения Кокрофта-Латама. *Деформация и разрушение материалов*. 2011. 7. С. 17–22.

8. Песин А.М., Пустовойтов Д.О., Локотунина Н.М. Оценка поврежденности металла при асимметричной тонколистовой прокатке алюминиевого сплава 5083. *Качество в обработке материалов*. 2015. 2 (4). С. 63–67.

REFERENCES

1. Erisov Ya. A., Grechnikov F.V., Grechnikov A.F. Study of the influence of rolling and heat treatment modes on the structure and properties of sheets from aluminum-lithium alloy V-1461. *Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2019. 5, pp. 5-10. (in Russian).

2. Kalinina, N.E., Bondarenko O.V. The use of aluminum alloys in aviation and rocket and space technology: training. manual. Dnipro: RVV DNU. 2011. 64 p. (in Ukrainian).

3. Bintu A., Vincze G., Picu R.C., Lopes A.B. Effect of symmetric and asymmetric rolling on the mechanical properties of AA5182. *Mater. Des*. 2016. 100, pp. 151 – 156.

4. Gogaev K.A., Voropaev V.S., Podrezov Yu.N., Verbilo D.G., Koryak O.S. Effect of deformation conditions on the properties of powder material AMg5. *Powder Metall. Metal Ceram*. 2015. 54 (5-6), pp. 274 – 280.

5. Kolmogorov V.L. Numerical modeling of large plastic deformations and destruction of metals. *Forging and stamping production*. 2003. 2, pp. 4 –16. (in Russian).

6. Cockcroft M. G., Latham D.J. Ductility and Workability of metals. *J. Inst. Metals*. 1968. 96, pp. 33 – 39.

7. Botkin A.V., Valiev R.Z., et al. Assessment of metal damage during cold plastic deformation using the Cockcroft-Latham fracture model. *Deformation and destruction of materials*. 2011. 7, pp. 17-22. (in Russian).

8. Pesin A.M., Pustovoitov D.O., Lokotunina N.M. Assessment of metal damage during asymmetric thin-sheet rolling of aluminum alloy 5083. *Quality in processing materials*. 2015. 2 (4), pp 63-67. (in Russian).

Koreva V. O. Cold rolling of Al-Mg system aluminum alloy

Aluminum weldable and thermally non-strengthening alloys of the Al-Mg system are widely used as light structural materials in various industries. Improving the specific strength characteristics of such alloys due to cold plastic deformation is one of the urgent scientific and technical problems. However, an important issue in the development of technological modes of plastic deformation of aluminum alloys is also the prediction of destruction, which is accompanied by the development and increase in the number of micropores and microcracks. In the work, the study of the deformation treatment of the aluminum alloy of the Al-Mg system by cold rolling was carried out. Numerical modeling of the process of cold rolling of aluminum alloy 5056 of the Al-Mg system was carried out by the finite element method using the DEFORM-3D software package for engineering analysis of technological operations of pressure metal processing. As a result of the numerical experiment, a graph of the moments occurring on the rolls was obtained. Distributions of stresses

(intensity of stresses and average stresses in the center of deformation) at the maximum moment on the rolls and deformations (intensity of deformations and other components) at the end of deformation were also obtained. An analysis of the damage accumulation established by simulation was carried out. In this paper, during numerical modeling, metal damage was calculated according to the Cockroft & Latham failure criterion. The results of experimental studies, including microstructures, after the rolling process are also given. It was established that after rolling we get a grain with a length of 100...200 microns and a width of 10...20 microns.

Keywords: *aluminium alloy, finite element method, modeling, rolling, stress intensity, strain intensity, average stresses, average strains, edge zones.*

Корева В. О. Холодная прокатка алюминиевого сплава системы Al-Mg

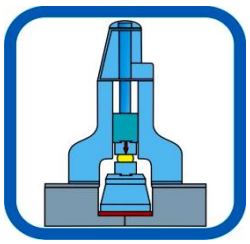
Алюминиевые сварные и термически не укрепляемые сплавы системы Al-Mg широко используются в качестве легких конструкционных материалов в различных отраслях промышленности. Улучшение удельных прочностных характеристик таких сплавов за счет холодной пластической деформации является одной из актуальных научно-технических проблем. Однако важным вопросом при разработке технологических режимов пластического формоизменения алюминиевых сплавов также является прогнозирование разрушения, которое сопровождается развитием и увеличением количества микропор и микротрещин. В работе выполнено исследование деформационной обработки алюминиевого сплава системы Al-Mg холодной прокаткой. Численное моделирование процесса холодной прокатки алюминиевого сплава 5056 системы Al-Mg выполняли методом конечных элементов с использованием программного комплекса для инженерного анализа технологических операций обработки металлов давлением DEFORM-3D. В результате численного эксперимента был получен график моментов, возникающих на валках. Также получены распределения напряжений (интенсивности напряжений и средних напряжений в очаге деформирования) при максимальном моменте на валках и деформациях (интенсивности деформаций и других компонентов) в конце деформирования. Проведен анализ накопления поврежденности, установленной моделированием. В данной работе при численном моделировании поврежденность металла рассчитывали по критерию разрушения Cockroft&Latham. Также приведены результаты экспериментальных исследований, в том числе микроструктуры после проведенного процесса прокатывания. Установлено, что после прокатки получаем зерно длиной 100...200 мкм и шириной 10...20 мкм.

Ключевые слова: *алюминиевый сплав, метод конечных элементов, моделирование, прокатка, интенсивность напряжений*, интенсивность деформаций, средние напряжения, средние деформации, краевые зоны.

Корева Віталій Олегович – аспірант, НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського»
Koreva Vitalii – PhD student, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute
Корева Виталий Олегович – аспирант, НТУУ «КПИ им. И. Сикорского»
E-mail: koreva85@gmail.com

НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського» – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute – National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine
НТУУ «КПИ им. И. Сикорского – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», г. Киев, Украина

Стаття надійшла до редакції 10.06.22 р.



РОЗДІЛ IV
ОБЛАДНАННЯ ТА УСТАТКУВАННЯ ОБРОБКИ ТИСКОМ

УДК 621.96.002.5 DOI: 10.37142/2076-2151/2022-1(51)154

Алієв І. С.
Марков О. Є.
Карнаух С. Г.

РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ КОНСТРУКЦІЙ ШТАМПІВ ДЛЯ РОЗДІЛЕННЯ ПРОФІЛІВ СКЛАДНОЇ КОНФІГУРАЦІЇ НА МІРНІ ЗАГОТОВКИ

Метою даної роботи є розробка перспективної конструкції штампа, в якому реалізована двохопорна схема відрізки зсувом заготовок складної несиметричної конфігурації та переднього упору до цього штампа. На підставі літературного та патентного пошуків визначено, що найбільш перспективною із усіх схем для розділення штанги з П-подібним несиметричним профілем на мірні заготовки, є багатоопорна схема відрізки, а саме – двохопорна схема. Застосування двохопорної схеми відрізки зсувом дозволяє у двічі підвищити продуктивність процесу відрізки. Особливістю двохопорної схеми є те, що перша і друга заготовки знаходяться у неоднакових напружено-деформованих станах при відрізці. Перша заготовка відділяється по одній поверхні розділу, а друга – по двох поверхнях розділу за рахунок двохопорної симетричної схеми. Перша заготовка має гірші показники геометричної точності, а друга – кращі показники геометричної точності та якість заготовки у цілому. Тобто симетричне навантаження усуває згин відрізаних заготовок, забезпечує притискання заготовки до ножа, виключає необхідність поперечного затиску, і сприяє підвищенню геометричної точності заготовок. Проведено моделювання процесу розділення штанги з П-подібним несиметричним профілем на мірні заготовки за схемою двохопорної відрізки зсувом за допомогою спеціалізованого програмного комплексу DEFORM 3D, а також експериментальні дослідження щодо моделювання процесу розділення заготовок із модельного матеріалу – пластиліну. Результати проведених досліджень підтвердили ефективність застосування двохопорної схеми відрізки зсувом, яка забезпечує задовільну якість отриманих заготовок. Більш високу якість має заготовка, яка відрізана за симетричною схемою навантаження. Основною проблемою таких штампів є те, що перша відрізана заготовка може бути видалена із робочої зони штампа способом прошитовхування штанги. При цьому упор, синхронно з переміщенням верхнього рухомого ножа до крайнього нижнього положення, повинен повернутися у вихідне положення, синхронно з поверненням у вихідне положення верхнього ножа. Для цього розроблено чотири перспективні конструкції переднього упору до штампа для розділення заготовок за схемою двохопорної відрізки зсувом, які забезпечують синхронну роботу упору з роботою самого штампа. Запропоновані конструкції забезпечують надійну роботу переднього упору штампа і підвищують культуру виробництва. Результати роботи можуть бути використані у заготівельному виробництві при розділенні сортового прокату на мірні заготовки.

Ключові слова: *упор, штамп, двохопорна схема, відрізка зсувом, геометрична точність, заготовка, якість, надійність.*

На сучасному етапі розвитку машинобудування задача економічного використання енергоресурсів і металу при його переробці має важливе значення і є актуальною.

Без розробки ефективного способу поділу сортового прокату на мірні заготовки неможлива розробка перспективної технології виробництва деталей.

При серійному та крупносерійному виробництві найбільш доцільним є застосування безвідхідного способу розділення сортового прокату відрізкою зсувом, який реалізується в штампах на пресах. Комплексні дослідження безвідходних способів поділу сортового прокату широко проводилися на території країн колишнього СРСР: «Мосстанкін», «ЕНІКМАШ», «Воронежське ВО по випуску важких механічних пресів», «Донпресмаш», «Харьківський авіаційній інститут», «Кишинівський політехнічний інститут», «Донецький фізико-технічний інститут», так і за кордоном: Англія, Німеччина, Японія та ін. За цей час накопичено великий об’єм відомостей про природу, механізми та критерії руйнування. У розвиток цієї науки внесли істотний

внесок вчені: K. Kessler, O. Keller, T. Nakagawa, T. Ekobori, E. Orovan, А. П. Гуляєв, і багато інших [1–4].

Слід зазначити значний внесок у створення теорії, технології й устаткування для безвідхідного поділу сортового прокату, який внесли вчені: Е. А. Попов, В. Т. Мещерин, К. Н. Богоявленський, В. А. Тимощенко, В. П. Романовський, В. А. Скороход, Е. М. Трет'яков, П. Е. Кислий, В. М. Кононенко, В. М. Финкель, С. С. Соловцев, Н. Л. Лисунець і ін. [5-11].

Якщо способи безвідхідного поділу прокату простих форм достатньо добре вивчені, то цього не можна стверджувати щодо поділу профілів складної несиметричної конфігурації. Недостатньо добре досліджені як технологія, так і штампове оснащення для поділу таких профілів способом відрізки зсувом на мірні заготовки для того, щоб науково обґрунтовано розробити технології, призначити режими деформації. Відсутні працездатні конструкції упорів, не визначені раціональні області їх застосування.

Метою даної роботи є розробка перспективної конструкції штампа, в якому реалізована двохопорна схема відрізки зсувом заготовок складної несиметричної конфігурації та переднього упору до цього штампа.

Одним із профілів складної несиметрічної конфігурації є П-подібний несиметричний профіль. На підставі літературного та патентного пошуків [12] визначено, що найбільш перспективною із усіх схем для розділення штанги з П-подібним несиметричним профілем на мірні заготовки, є багатоопорна схема відрізки. Найбільш часто використовують двохопорну схему відрізки. Тому за принципову схему штампа була обрана саме двохопорна схема відрізки.

Принципова схема штампа для двохопорної відрізки зсувом представлена на рис. 1 [13]. Штанга 1 подається до упору 2 і розміщується на опорних поверхнях нерухомих ножів 3,4. Верхній рухомий ніж 5, під дією сили приводу, рухається вниз і здійснює відрізку одразу двох заготовок.

Застосування двохопорної схеми відрізки зсувом дозволяє у двічі підвищити продуктивність процесу відрізки. Особливістю двохопорної схеми є те, що перша і друга заготовки знаходяться у неоднакових напружено-деформованих станах при відрізці. Перша заготовка відділяється по одній поверхні розділу, а друга – по двох поверхнях розділу при двохопорному симетричному розміщенню частини прутка. Перша заготовка має гірші показники геометричної точності, а друга – кращі показники геометричної точності та якість заготовки у цілому. Тобто симетричне навантаження усуває згин відрізаних заготовок, забезпечує притискання заготовки до ножа, виключає необхідність поперечного затиску, і сприяє підвищенню геометричної точності заготовок (див. рис. 1).

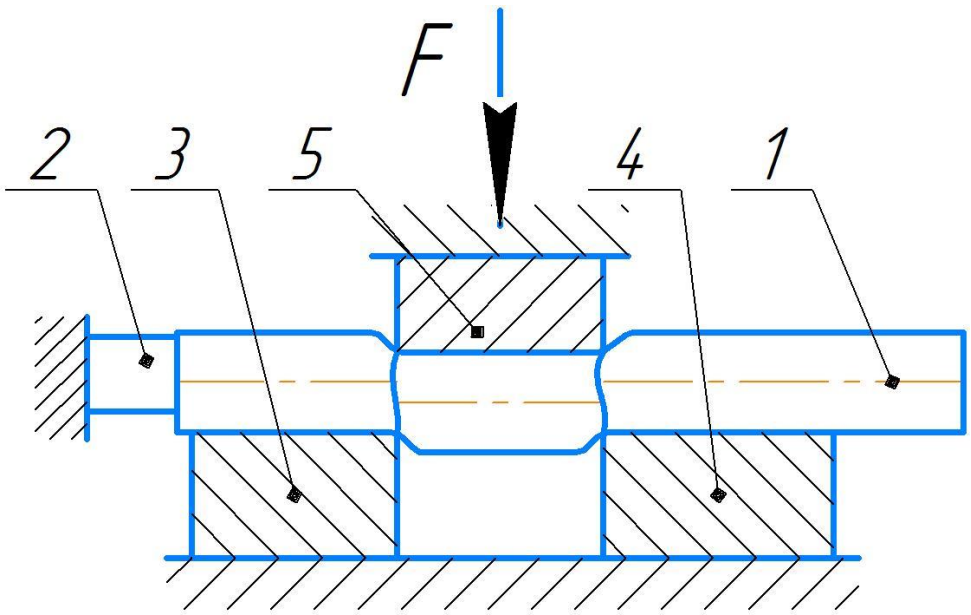


Рис. 1. Принципова схема штампа, в якому реалізована двохопорна схема відрізки зсувом [13]

Для підтвердження зроблених виводів, щодо геометричної точності відрізаних заготовок, проведено моделювання процесу розділення штанги з П-подібним несиметричним профілем на мірні заготовки за схемою двохопорної відрізки зсувом за допомогою спеціалізованого програмного комплексу DEFORM 3D. Результатом розділення є деталь – клема роздільного рейкового скріплення залізничної колії із сталі Ст 4кп (ДСТУ 2651-94) із розмірами, вказаними на рис. 2.

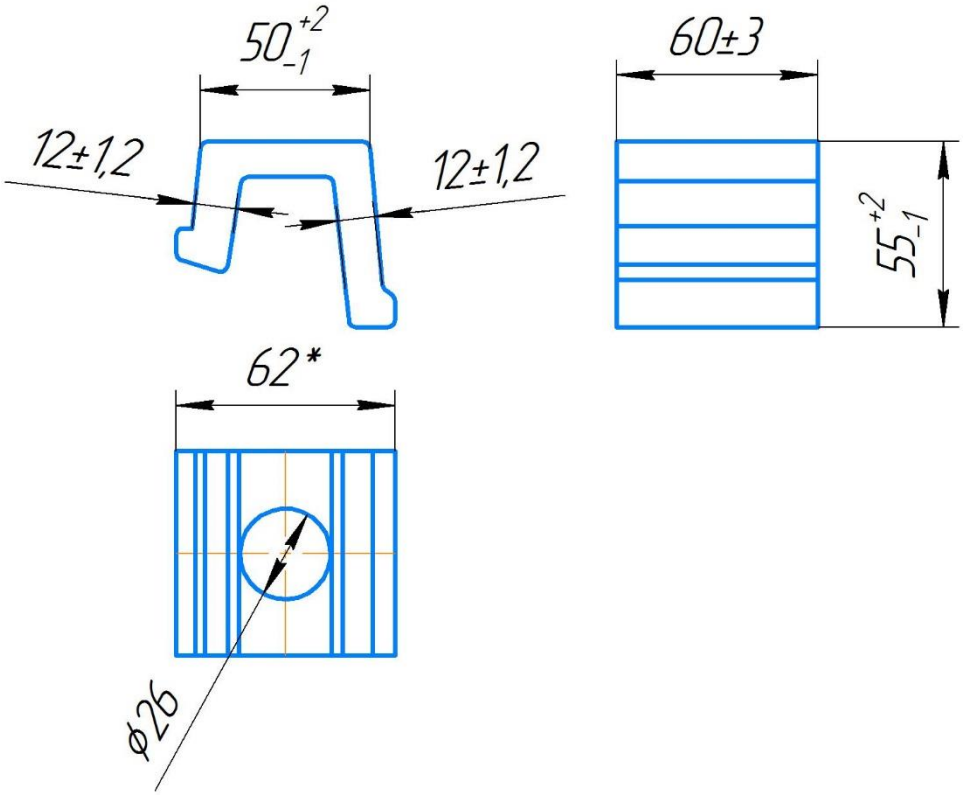


Рис. 2. Деталь «Клема роздільного рейкового скріплення залізничної колії»

Результати розрахунку представлено на рис. 3. Аналіз проведених розрахунків показує, що застосування двохопорної схеми забезпечує можливість отримання заготовок задовільної геометричної точності. Більш високу якість має заготовка, яка відрізана за симетричною схемою навантаження.

Проведені експериментальні дослідження щодо моделювання процесу розділення заготовок із модельного матеріалу – пластиліну (рис. 4) підтвердили результати моделювання DEFORM 3D. Геометрична точність заготовки, які відрізаються за симетричною схемою «на провал», має більш високі показники якості.

Для забезпечення нормальної роботи штампа, в якому може бути реалізована двохопорна схема відрізки зсувом заготовок складної несиметричної конфігурації, необхідно запропонувати конструкцію переднього упору, робота якого повинна бути синхронізована з кінематикою роботи самого штампа.

Основною проблемою таких штампів є те, що перша відрізана заготовка може бути видалена із робочої зони штампа способом проштовхування штанги. При цьому упор 2 (див. рис. 1), синхронно з переміщенням верхнього ножа до крайнього нижнього положення, повинен перемістится із свого положення для того, щоб звільнити місце для видалення заготовки із робочої зони штампа. У заключний період видалення першої заготовки упор повинен повернутися у вихідне положення, синхронно з поверненням у вихідне положення верхнього ножа. Це необхідно зробити для того, щоб обмежити переміщення штанги, яка займає вихідне положення для здійснення наступного робочого ходу.

Нажаль, в літературі конструкції подібних передніх упорів відсутні. Тому в даній статті запропоновано декілька конструкцій, які мають свої переваги та недоліки.

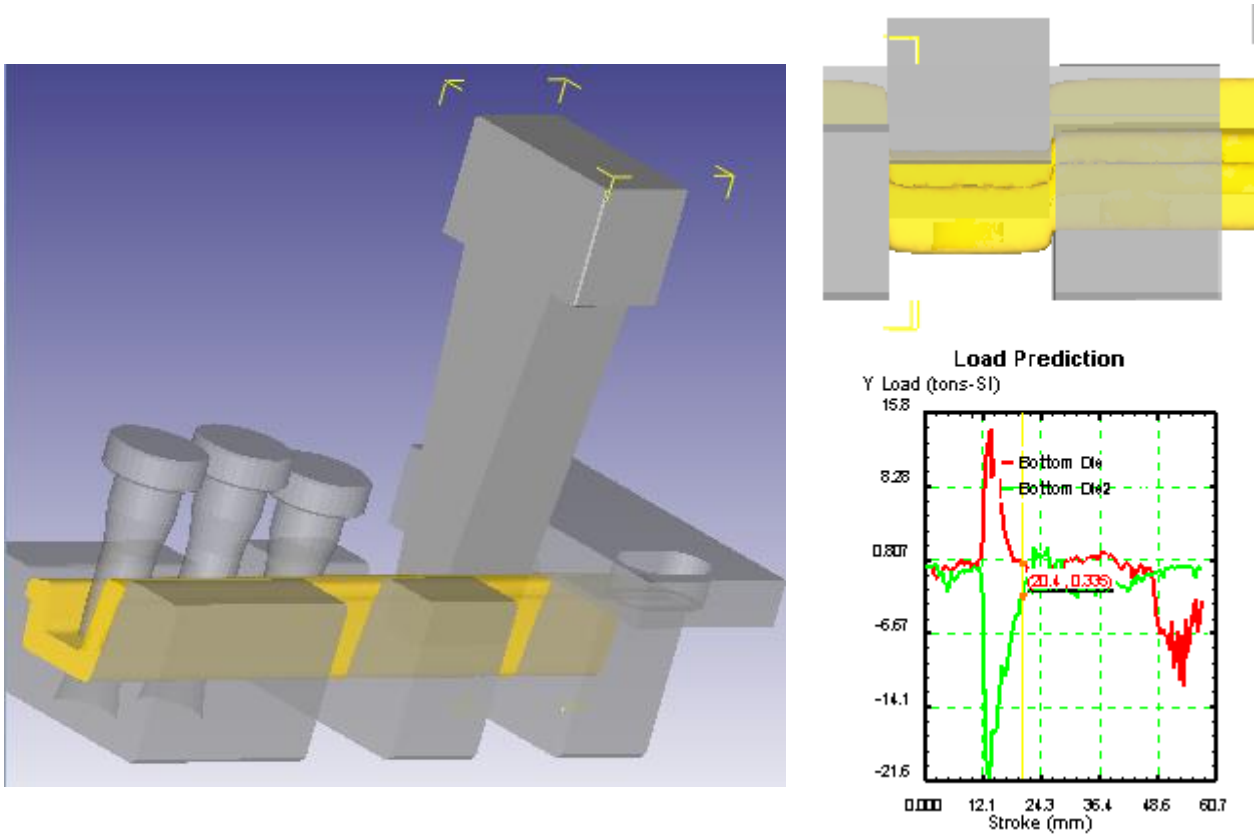


Рис. 3. Результати розрахунків за допомогою програми DEFORM 3D

Рис. 4. Результати експерименту

Перша конструкція запропонованого упору збудована на застосуванні клинового механізму, який працює надійно та має достатню жорсткість. Упор здійснює горизонтальний зворотно-поступальний рух. Упор до штампа для розділення сортового прокату (рис. 5) містить: корпус 1, встановлений з можливістю осьового і вертикального переміщення на задану відстань відповідно довжині відрізаємої мірної заготовки із сортового прокату 2, упор, який виконано у вигляді плити 3, встановленої у напрямних 4 корпусу 1 з можливістю горизонтального зворотно-поступального руху і підпружиненої за допомогою пружини 5 та шпильок 6 відносно корпусу 1, Плита 3 контактує по клиновій поверхні з клином 7, встановленим у напрямних корпусу 1 з можливістю вертикального зворотно-поступального руху. Вихідне положення клину 7 фіксується за допомогою гвинта 8.

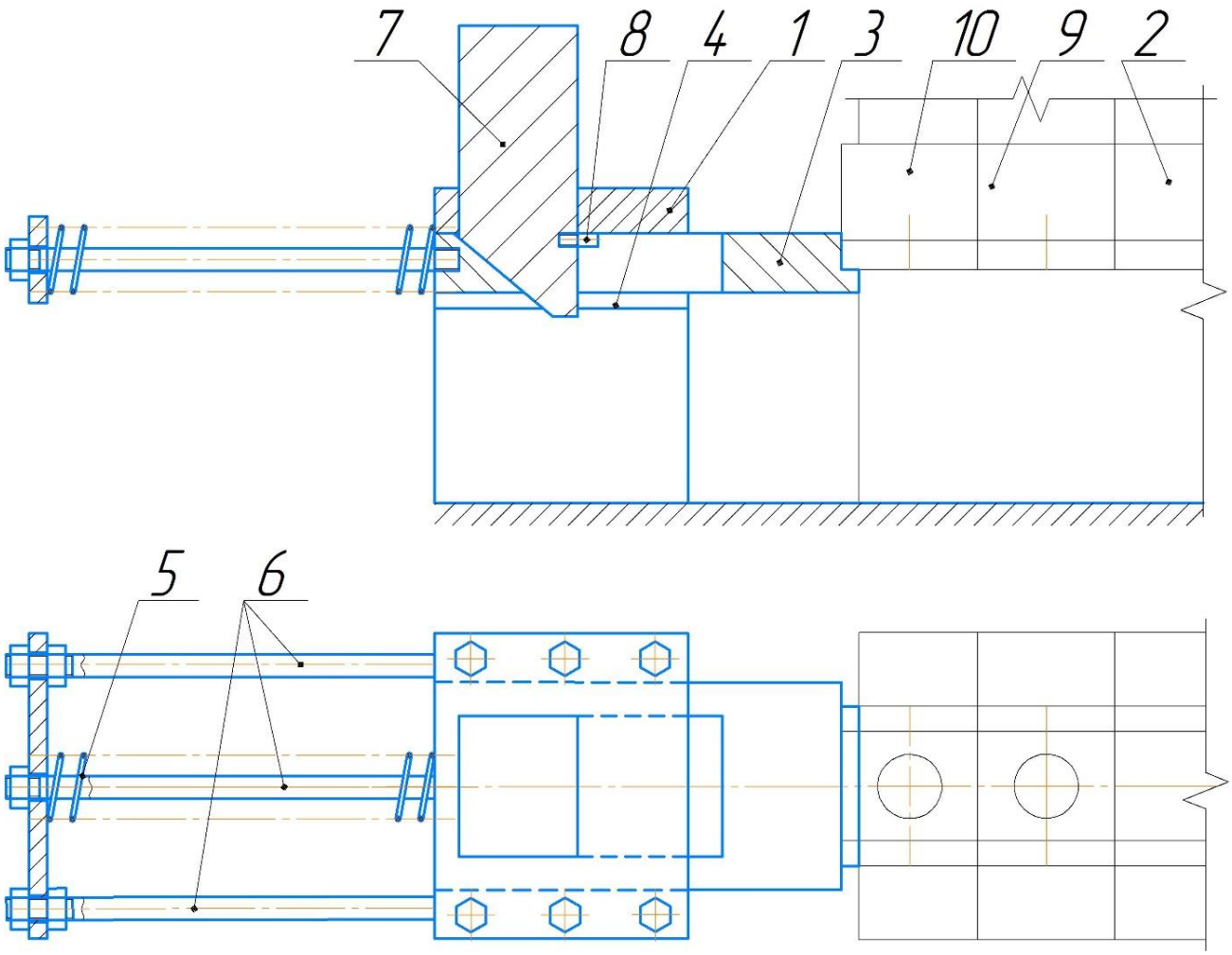


Рис. 5. Конструкція упору до штампа

Дана конструкція переднього упору вирішує поставлені задачі. Але спричиняє досить великі навантаження на направляючі плити 3 внаслідок великих значень кута клину 7, обраного таким з метою зменшення вертикального ходу клину 7 та збільшення горизонтального ходу плити 3.

Упор до штампа для розділення сортового прокату працює у такий спосіб. Сортовий прокат 2 подається у робочу порожнину ножів штампа, в якому реалізована схема двохопорної відрізки зсувом, до упору в плиту 3. При робочому ході преса повзун (не показаний) рухається вниз, здійснюючи відрізку одночасно двох заготовок, одна з яких (9) видаляється «на провал», а друга (10) залишається у робочій порожнині штампа. Одночасно при цьому повзун взаємодіє з клином 7, вихідне положення якого фіксується за допомогою гвинта 8. Під дією сили повзуна клин 7 рухається вертикально у напрямних корпусу 1 і забезпечує горизонтальне переміщення плити 3 в сторону від відрізаємої заготовки 10, звільняючи перед нею простір. Це дозволяє, у момент повернення повзуна преса у вихідне положення, проштовхнути відрізану заготовку 10 штангою сортового прокату 2 із робочої порожнини ножів штампа. Відрізана заготовка 10 під дією сили тяжіння падає в тару. Цикл роботи упору до штампа поновлюється.

Наступна конструкція упору відрізняється тим, що відрізана заготовка видаляється із робочої зони безпосередньо самим упором, за рахунок горизонтального зворотно-поступального руху. Ця конструкція підходить для відрізки заготовок, в яких попередньо пробитий отвір.

Упор до штампа для розділення сортового прокату (рис. 6) містить: корпус 1, встановлений з можливістю осьового і вертикального переміщення на задану відстань відповідно довжині мірної заготовки, відрізаємої від сортового прокату 2 і упор. Упор виконано у вигляді плити 3, встановленої у напрямних 4 корпусу 1 з можливістю горизонтального зворотно-поступального руху і підпружиненої за допомогою пружини 5 та шпильок 6 відносно корпусу 1,

яка контактує по клиновій поверхні з клином 7, встановленим у напрямних корпусу 1 з можливістю вертикального зворотно-поступального руху. Вихідне положення клину 7 фіксується за допомогою гвинта 8. При цьому в отворі плити 2 розміщено уловлювач 9 з клиновою поверхнею 10 з можливістю взаємодії з отвором відрізаної заготовки 11 і підпружинено пружиною 12, яка утримується планкою 13.

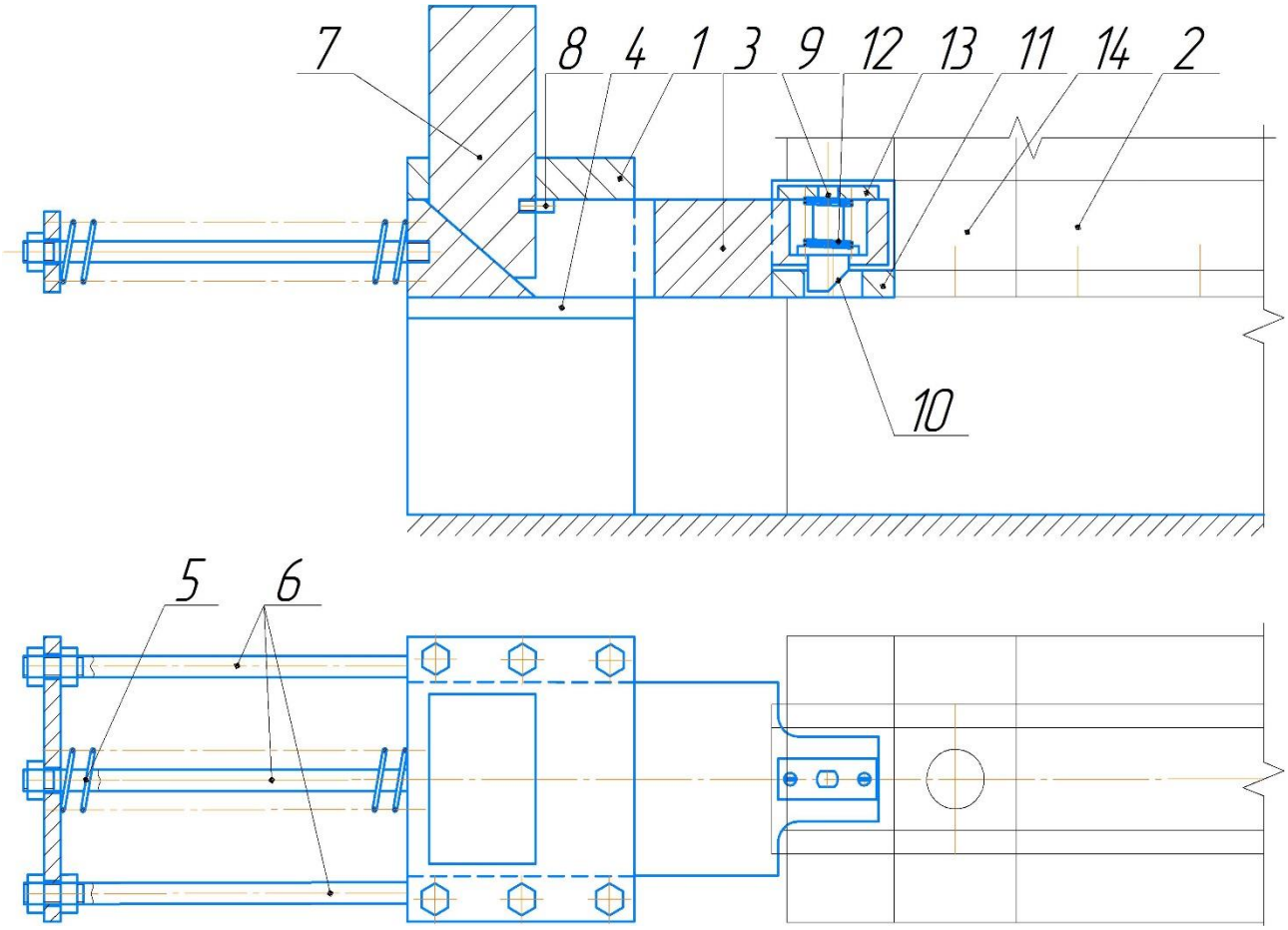


Рис. 6. Конструкція упору до штампа

Упор до штампа для розділення сортового прокату працює у такий спосіб. Сортовий прокат 2 подається у робочу порожнину ножів штампа, в якому реалізована схема двохопорної відрізки зсувом, до упору в плиту 3. При цьому прокат 2 під дією зусилля подачі взаємодіє з клиновою поверхнею 10 уловлювача 9, який, спочатку, витискається угору, а потім, під дією пружини 12, займає місце в отворі заготовки 11, забезпечуючи відрізку заготовок заданої довжини. При робочому ході преса повзун (не показаний) рухається вниз, здійснюючи відрізку одночасно двох заготовок, одна з яких 14 видаляється «на провал», а друга 11 залишається у робочій порожнині штампа. Одночасно при цьому повзун взаємодіє з клином 7, вихідне положення якого фіксується за допомогою гвинта 8. Клин 7 рухається вертикально у напрямних корпусу 1 та, в свою чергу, забезпечує горизонтальне переміщення плити 2, яка за рахунок уловлювача 9, що знаходиться в отворі заготовки, видаляє відрізану заготовку 11 із робочої порожнини штампа. Заготовка 11 за рахунок сили тяжіння вільним падінням потрапляє в тару. Цикл роботи упору до штампа поновлюється.

Наступна конструкція упору (рис. 7) забезпечує вертикальне переміщення самого упору для вивільнення простору з метою видалення відрізаної заготовки з робочої зони штампа. При цьому сигнал на «спрацювання» упору йде від штанги, якою проштовхується відрізана заготовка.

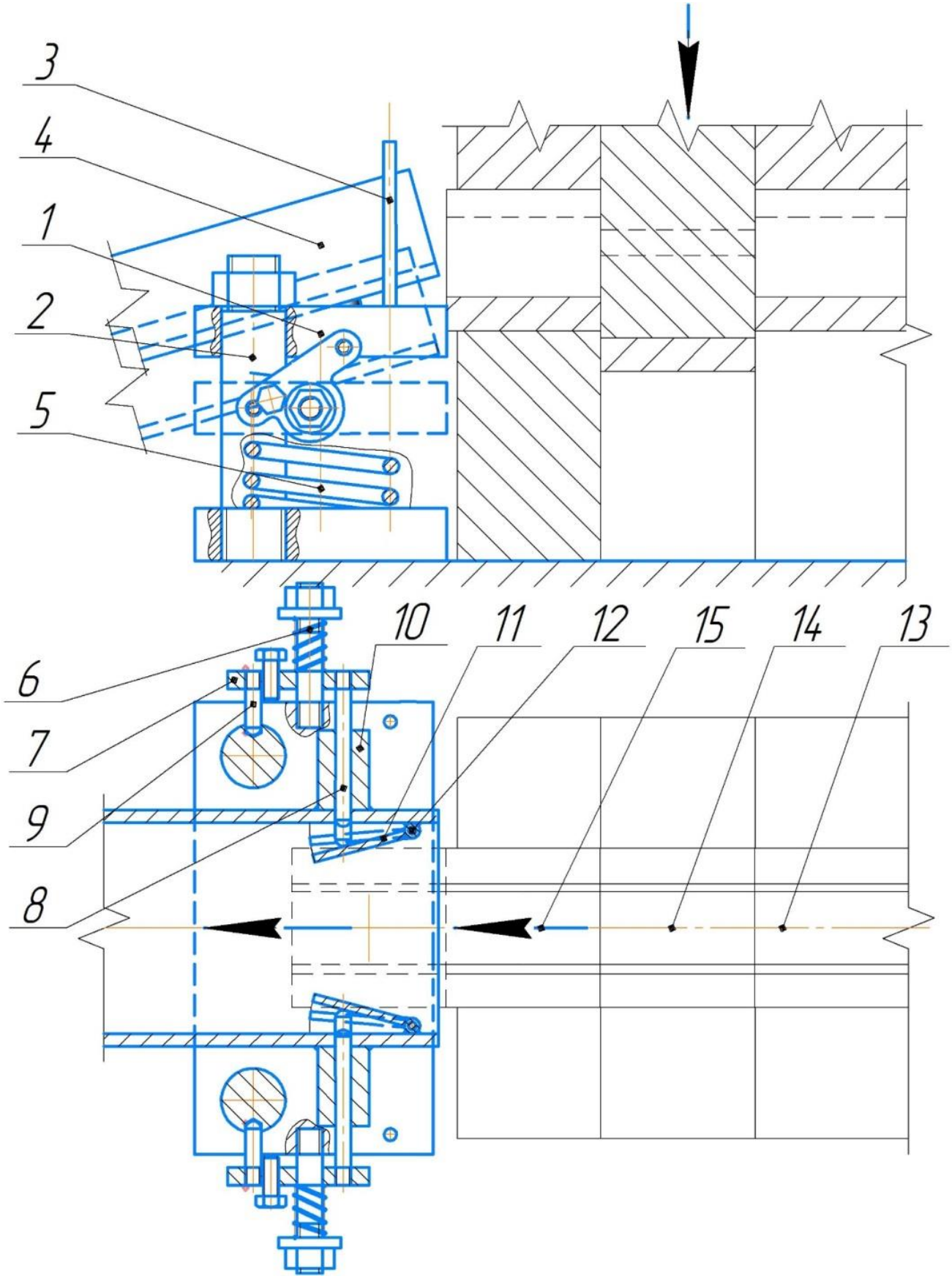


Рис. 7. Конструкція упору до штампа

Упор до штампа для розділення сортового прокату відрізкою зсувом містить: саме упор, виконаний у вигляді плити 1, встановленої з можливістю вертикального зворотно-поступального руху по напрямним колонкам 2 під дією сили приводу через проставки 3 і механізм

фіксації упору у заданому положенні в процесі відрізки заготовки. При цьому плита 1 оснащена лотком 4, який розміщається під кутом до плити 1 і підпружинена за допомогою пружини 5, а механізм фіксації виконаний у вигляді підпружинених (за допомогою пружин 6) плит 7 з вкрученими в них стрижнями 8,9, розміщеними симетрично по обидві сторони лотка 4, що направляються напрямними втулками 10, закріпленими до лотка. Стрижні з одного боку (8) встановлені з можливістю взаємодії зі стулками 11, закріпленими до лотка 4 за допомогою осей 12, а з другого (9) – з відповідними отворами, виконаними у напрямних колонках 2.

Упор до штампа для розділення сортового прокату працює у такий спосіб. Сортовий прокат 13 подається у робочу порожнину ножів штампа до упору в плиту 1. Під дією сили приводу повзун здійснює розділення прокату за схемою двохопорної відрізки зсувом. Одночасно відрізається дві заготовки. Перша заготовка 14 видаляється із робочої зони штампа «на провал». Друга 15 залишається в робочій порожнині ножа. Одночасно при цьому повзун через проставки 3 переміщує плиту 1 по напрямним колонкам 2 до нижнього крайнього положення, в якому плита 1 фіксується. Фіксація здійснюється за рахунок того, що стрижні 9 займають положення у відповідних отворах колонок 2 під діє сил з боку пружин 6. Після відрізки заготовок повзун і деталі штампа повертаються у вихідне положення на холостому ході пресу. Відрізана заготовка 15 проштовхується силою подачі прокату 13 і взаємодіє зі стулками 11, які обертаються навколо осей 12 і натискають на стрижні 8. Стрижні 8, разом з плитами 7 та стрижнями 9 віджимаються від колонок 2 і під дією пружини 5, разом з плитою 1 повертаються у вихідне положення. Одночасно заготовка 15 по нахиленому лотку 4 попадає до тари. Цикл роботи упору до штампа поновлюється.

Можливою проблемою такої конструкції упору до штампа є те, що відрізана заготовка може застряти між стулками 11. Тому треба дуже чітко підбирати попередню силу стискання пружин 6 та кут нахилу лотка 4.

Найбільш перспективною конструкцією упору до штампа для відрізки профілів за двох опорною схемою є конструкція наведена на рис. 8. Вона більш проста при реалізації, що надає їй риси надійності. Упор до штампа для розділення сортового прокату містить: саме упор, встановлений з можливістю вертикального зворотно-поступального руху під дією сили приводу і механізм фіксації упору у заданому положенні в процесі відрізки заготовки. При цьому упор виконано у вигляді стрижнів 1 з напрямними елементами 2, встановленими у напрямних планках 3 і підпружинено за допомогою пружин 4. Механізм фіксації виконано у вигляді підпружинених (за допомогою пружин 5) упорних важелів 6, встановлених симетрично відносно осі подачі прокату 7 і одним кінцем консольно закріплених за допомогою осей 8, а другим, з можливістю контакту з відповідними пазами, виконаними на зовнішніх поверхнях стрижнів 1, при цьому упорні важелі 6 додатково обладнані роликами 9, встановленими на осях 10, закріплених на упорних важелях 6.

Упор до штампа для розділення сортового прокату працює у такий спосіб. Сортовий прокат 7 подається у робочу порожнину ножів штампа до упору в стрижні 1. Під дією сили приводу повзун здійснює розділення прокату за схемою двохопорної відрізки зсувом. Одночасно відрізаються дві заготовки. Перша заготовка 11 видаляється із робочої зони штампа «на провал». Друга 12 залишається в робочій порожнині ножа. Одночасно при цьому повзун через проставки переміщує стрижні 1 разом з напрямним елементом 2 до нижнього крайнього положення, в якому стрижні 1 фіксуються. Фіксація здійснюється за рахунок того, що упорні важелі 6, під дією пружин 5, займають положення у відповідних пазах стрижнів 1. Після відрізки заготовок повзун і деталі штампа повертаються у вихідне положення на холостому ході пресу. Відрізана заготовка 12 проштовхується силою подачі прокату 7 і взаємодіє з роликами 9, які разом з упорними важелями 6 повертаються навколо осей 8. Таким чином упорні важелі 6 віджимаються із пазів і стрижні 1, під дією пружин 4, повертаються у вихідне положення. Одночасно заготовка 12 попадає до тари. Цикл роботи упору до штампа поновлюється.

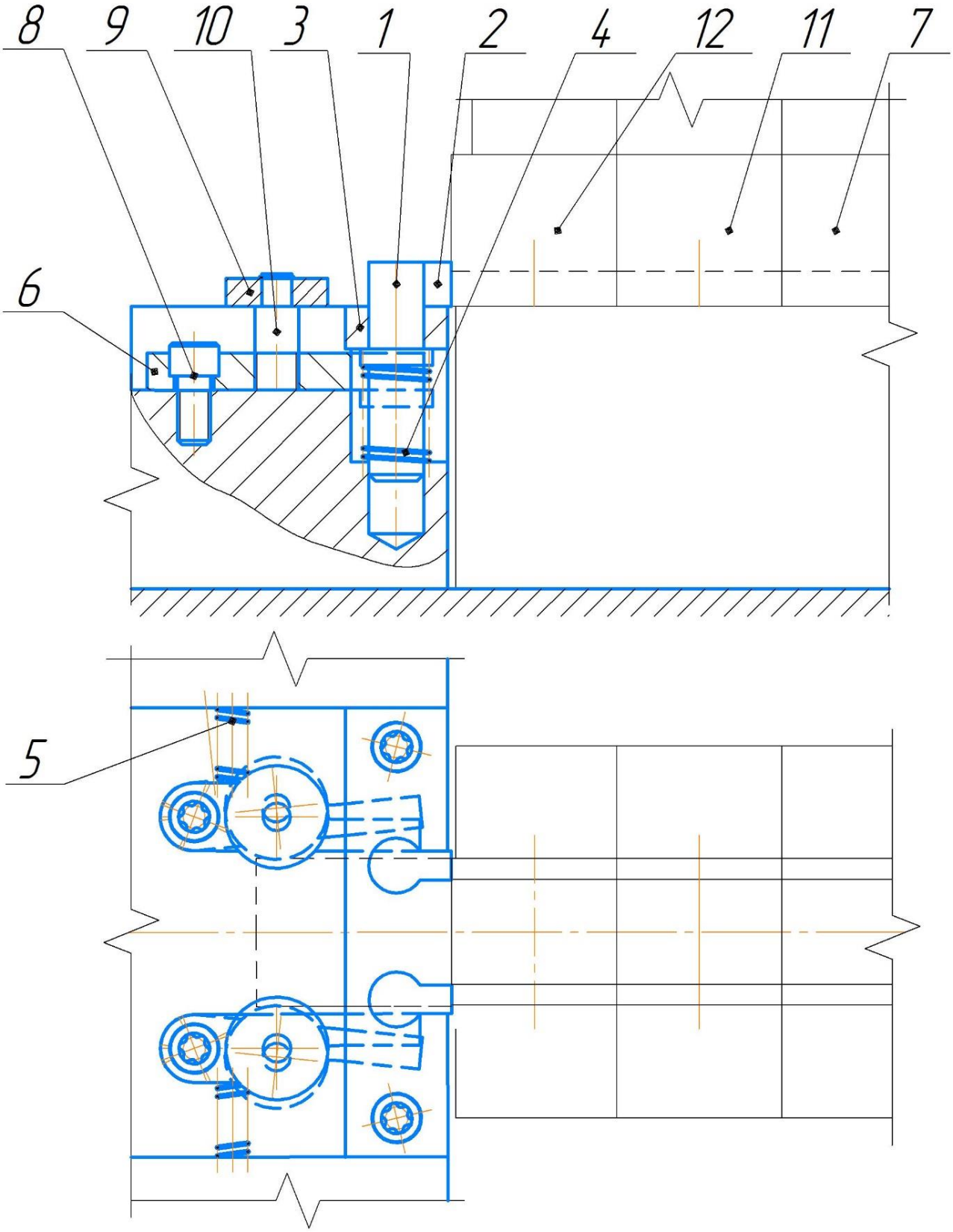


Рис. 8. Конструкція упору до штампа

ВИСНОВКИ

1. На підставі літературного та патентного пошуків визначено, що найбільш перспективною із усіх схем для розділення штанги з П-подібним несиметричним профілем на мірні заготовки, є багатоопорна схема відрізки, а саме – двохопорна схема. Застосування двохопорної схеми відрізки зсувом дозволяє у двічі підвищити продуктивність процесу відрізки. Перша заготовка має гірші показники геометричної точності, а друга – задовільні. Це стає можливим завдяки симетричності навантаження другої заготовки, який усуває згин відрізаних заготовок, забезпечує притискання заготовки до ножа, виключає необхідність поперечного затиску, і сприяє підвищенню геометричної точності заготовок.

2. Проведено моделювання процесу розділення штанги з П-подібним несиметричним профілем на мірні заготовки за схемою двохопорної відрізки зсувом за допомогою спеціалізованого програмного комплексу DEFORM 3D, а також експериментальні дослідження щодо моделювання процесу розділення заготовок із модельного матеріалу – пластиліну. Результати проведених досліджень підтвердили ефективність застосування двохопорної схеми відрізки зсувом, яка забезпечує задовільну якість отриманих заготовок. Більш високу якість має заготовка, яка відрізана за симетричною схемою навантаження.

3. Розроблено чотири перспективні конструкції упору до штампа для розділення заготовок за схемою двохопорної відрізки зсувом, які забезпечують синхронну роботу упору з роботою самого штампа. Запропоновані конструкції забезпечують надійну роботу переднього упору штампа та підвищують культуру виробництва.

4. Результати роботи можуть бути використані у заготівельному виробництві при розділенні сортового прокату на мірні заготовки.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Lisunets N. L. Usage of physical and mathematical simulation for improvement of the processes of metal shear cutting. *CIS Iron and Steel Review*. № 17(2019). P. 34–38.

2. Lisunets N. L. Improving the efficiency of the processes of billets manufacture from rolled metal via shift cutting based on simulation. *Chernye Metally*. № 6(2018). P. 31–35.

3. Lisunets N. L., Demetrashvili I. S., Goyi H. M. Development and characterization of the manufacturing process of cylindrical-shaped semi-finished products from non-ferrous alloys for stamping on the basis of modeling. *Tsvetnye Metally*. №5(2018). P. 82–85.

4. Karnaukh S. G., Markov O. E., Aliieva L. I., Kukhar V. V. Designing and researching of the equipment for cutting by breaking of rolled stock. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. №109(2020). P. 2457-2464.

5. Karnauh S., Karnaukh D. Research of the influence of deformation speed on energy and power adjectives of the process of three-point cold bend breaking and on alignment integrity of raw parts. *Metallurgical and Mining Industry*. №3(2011). P. 107-114.

6. Karnaukh S. G. Studying the process of static-dynamic loading of a preform according to the scheme of three-point breaking by bending in press-hammers. *Kuznechno-Shtampovochnoe Proizvodstvo (Obrabotka Metallov Davleniem)*. №2(2001). P. 8-12.

7. Chikishev D. Mathematical modeling of steel chemical composition and modes of thermomechanical treatment influence on hot-rolled plate mechanical properties. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. №92(2017), P. 3725-3738.

8. Koo J. Y., Luton M. J. Metallurgical design of ultra-high strength steels for gas pipeline. *Proceedings of the thirteenth international offshore and polar engineering conference honolulu*. 2003. P. 10–18.

9. Yin J-F, Bai Q., Zhang B. Methods for detection of subsurface damage: a review. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. №31(2018). P. 1–14. https://doi.org/10.1186/s10033-018-0229-2.

10. Nath C., Rahman M. A study on ultrasonic vibration cutting of low alloy steel. *Journal of Materials Processing Technology*. №192-193(2007). P. 159–165. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.04.047.

11. He Sui, Lifeng Zhang, Shuang Wang. Transient separation cutting characteristic of axial ultrasonic vibration–assisted cutting. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. №110(2020). P.2407-2425.

12. Сердюк А. И. Особенности технологии безотходного разделения фасонных П-образных профилей в штампах со сложным движением ножей. Мариуполь: ПГТУ. 2015. 139 с.

13. Соловцов С. С. Безотходная разрезка сортового проката в штампах. Москва: Машиностроение. 1985. 176 с.

REFERENCES

1. Lisunets N. L. Usage of physical and mathematical simulation for improvement of the processes of metal shear cutting. *CIS Iron and Steel Review*. № 17(2019). P. 34–38.

2. Lisunets N. L. Improving the efficiency of the processes of billets manufacture from rolled metal via shift cutting based on simulation. *Chernye Metally*. № 6(2018). P. 31–35.

3. Lisunets N. L., Demetrashvili I. S., Goyi H. M. Development and characterization of the manufacturing process of cylindrical-shaped semi-finished products from non-ferrous alloys for stamping on the basis of modeling. *Tsvetnye Metally*. №5(2018). P. 82–85.

4. Karnaukh S. G., Markov O. E., Aliieva L. I., Kukhar V. V. Designing and researching of the equipment for cutting by breaking of rolled stock. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. №109(2020). P. 2457-2464.

5. Karnauh S., Karnaukh D. Research of the influence of deformation speed on energy and power adjectives of the process of three-point cold bend breaking and on alignment integrity of raw parts. *Metallurgical and Mining Industry*. №3(2011). P. 107-114.

6. Karnaukh S. G. Studying the process of static-dynamic loading of a preform according to the scheme of three-point breaking by bending in press-hammers. *Kuznechno-Shtampovochnoe Proizvodstvo (Obrabotka Metallov Davleniem)*. №2(2001). P. 8-12.

7. Chikishev D. Mathematical modeling of steel chemical composition and modes of thermomechanical treatment influence on hot-rolled plate mechanical properties. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. №92(2017), P. 3725-3738.

8. Koo J. Y., Luton M. J. Metallurgical design of ultra-high strength steels for gas pipeline. *Proceedings of the thirteenth international offshore and polar engineering conference honolulu*. 2003. P. 10–18.

9. Yin J-F, Bai Q., Zhang B. Methods for detection of subsurface damage: a review. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. № 31(2018). P. 1–14. https://doi.org/10.1186/s10033-018-0229-2.

10. Nath C., Rahman M. A study on ultrasonic vibration cutting of low alloy steel. *Journal of Materials Processing Technology*. №192-193(2007). P. 159–165. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.04.047.

11. He Sui, Lifeng Zhang, Shuang Wang. Transient separation cutting characteristic of axial ultrasonic vibration–assisted cutting. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. №110(2020). P.2407-2425.

12. Serdyuk A. I. Features of technology of waste-free separation of shaped U-shaped profiles in stamps with complex movement of knives. Mariupol: PSTU. 2015. 139 p. (*in Russian*).

13. Solovtsov S. S. Waste-free cutting of high-quality rolled products in stamps. Moscow: Mechanical Engineering. 1985. 176 p. (*in Russian*).

Алиев И. С., Марков О. Е., Карнаух С. Г. Разработка и исследование конструкций штампов для разделения профилей сложной конфигурации на мерные заготовки

Целью данной работы является разработка перспективных конструкций штамповой оснастки, в которой реализована двухопорная схема отрезки сдвигом заготовок сложной несимметричной конфигурации и переднего упора к этому штампу. На основании литературного и патентного поисков определено, что наиболее перспективной из всех схем для разделения штанги с П-образным несимметричным профилем на мерные заготовки является многоопорная схема отрезки, а именно – двухопорная схема. Применение двухопорной схемы отрезки сдвигом позволяет в два раза повысить производительность процесса отрезки. Особенностью двухопорной схемы является то, что первая и вторая заготовки находятся в неодинаковых напряженно-деформированных состояниях при отрезке. Первая заготовка разделяется по одной поверхности раздела, а вторая – по двух поверхностях разделения при двухопорном симметричном размещении отрезаемой части. Первая заготовка имеет худшие показатели геометрической точности, а вторая – лучшие показатели геометрической точности и качество заготовки в целом. То есть симметричная нагрузка устраняет изгиб отрезанных заготовок, обеспечивает прижим заготовки к ножу, исключает необходимость поперечного зажима, и способствует повышению геометрической точности заготовок. Проведено моделирование процесса разделения штанги с П-образным несимметричным профилем на мерные заготовки по схеме двухопорной отрезки сдвигом с помощью специализированного программного комплекса DEFORM 3D, а также экспериментальные исследования по моделированию процесса разделения заготовок из модельного материала – пластилина. Результаты проведенных исследований подтвердили эффективность применения двухопорной схемы отрезки сдвигом, которая обеспечивает удовлетворительное качество полученных заготовок. Более высокое качество имеет заготовка, которая отрезана по симметричной схеме нагружения. Основной проблемой таких штампов является то, что первая отрезанная заготовка может быть удалена из рабочей зоны штампа способом проталкивания штанги. При этом упор, синхронно с перемещением верхнего подвижного ножа до крайнего нижнего положения, должен вернуться в исходное положение, синхронно с возвращением в исходное положение верхнего ножа. Для этого разработаны четыре перспективные конструкции упора к штампу для разделения заготовок по схеме двухопорной отрезки сдвигом, которые обеспечивают синхронную работу упора с работой самого штампа. Предложенные конструкции обеспечивают надежную работу переднего упора штампа и повышают культуру производства. Результаты работы могут быть использованы в заготовительном производстве при разделении сортового проката на мерные заготовки.

Ключевые слова: *упор, штамп, двухопорная схема, отрезка сдвигом, геометрическая точность, заготовка, качество, надежность.*

Aliiev I. S., Markov O. E., Karnaukh S. G. Development and research of structures of dies for dividing profiles of complex configuration into dimensional blanks

The purpose of this work is to develop promising designs of die equipment, in which a two-support scheme for shearing workpieces of a complex asymmetric configuration and a front stop to this die is implemented. Based on literature and patent searches, it was determined that the most promising of all schemes for dividing a rod with a U-shaped asymmetric profile into dimensional blanks is a multi-support cutting scheme, namely, a two-support scheme. The use of a two-bearing scheme for parting off by a shift makes it possible to double the productivity of the parting process. A feature of the two-support scheme is that the first and second workpieces are in unequal stress-strain states during cutting. The first workpiece is divided along one interface, and the second - along two separation surfaces with a two-support symmetrical placement of the part to be cut. The first workpiece has the worst indicators of geometric accuracy, and the second one has the best indicators of geometric accuracy and the quality of the workpiece as a whole. That is, a symmetrical load eliminates the bending of the cut blanks, ensures that the blank is pressed against the knife, eliminates the need for transverse clamping, and improves the geometric accuracy of the blanks. The process of separating a rod with a U-shaped asymmetric profile into measured blanks according to the scheme of a two-support segment by shear using a specialized software package DEFORM 3D, as well as experimental studies on modeling the process of separating blanks from a modeling material - plasticine, was carried out. The results of the studies carried out confirmed the effectiveness of the use of a two-bearing shear cutting scheme, which ensures a satisfactory quality of the obtained workpieces. A workpiece cut according to a symmetrical loading scheme has a higher quality. The main problem with such dies is that the first cut blank can be removed from the working area of the die by pushing the rod. In this case, the stop, synchronously with the movement of the upper movable knife to the lowest position, must return to its original position, synchronously with the return of the upper knife to its original position. For this, four promising designs of the stop to the die were developed for separating workpieces according to the scheme of two-bearing segments by shear, which provide synchronous operation of the stop with the work of the die itself. The proposed designs provide reliable operation of the front stop of the die and improve the culture of production. The results of the work can be used in blank production when separating long products into cut-to-length blanks.

Key words: *stop for stamp, punch, two-support scheme, cut by shift, geometric accuracy, workpiece, quality, reliability.*

Алієв Іграмотдін Сєражутдінович – д-р техн. наук, проф., зав. кафедрою ДДМА
Алиев Игрaмотдин Серажутдинович – д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой ДГМА
Aliiev Igramotdin – Doctor of Technical Sciences, Professor of the DSEA
E-mail: igramaliev@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4248-8214

Марков Олег Євгенійович – д-р техн. наук, проф., зав. кафедрою ДДМА
Марков Олег Евгеньевич – д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой ДДМА
Markov Oleg – Doctor of Technical Sciences, Professor of the DSEA
E-mail: oleg.markov.omd@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9377-9866

Карнаух Сергій Григорович – канд. техн. наук, доцент , зав. кафедрою ДДМА
Карнаух Сергей Григорьевич – канд. техн.наук, доцент, зав. кафедрой ДГМА
Karnaukh Sergii – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the DSEA
E-mail: karnaukh.sergii@gmail.com.
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2878-4065

ДДМА – Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ
ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск
DSEA – Donbass State Engineering Academy, Kramatorsk, Ukraine

Статья надійшла до редакції 12.04.22 р.

УДК 621.73.16 DOI: 10.37142/2076-2151/2022-1(51)166

Гожій С. П.
Мироненко В. А.

ПЕРЕДУМОВИ СТВОРЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ І ОБЛАДНАННЯ ОРБІТАЛЬНОГО ШТАМПУВАННЯ ОБКОЧУВАННЯМ

Наукові дослідження процесів і обладнання орбітального штампування обкочуванням проводяться на кафедрі технології виробництва літальних апаратів Науково-навчального механіко-машинобудівного інституту Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» з 70 років минулого століття до теперішнього часу. За цей час накопчений достатній досвід створення енергоефективних технологій і обладнання для орбітального штампування обкочуванням. Всі наукові розробки створені на підставі якісних ефектів процесу та підкреслюють його унікальні можливості та перспективу застосування. Зважаючи на те, що сучасним інструментом дослідження процесів обробки металів тиском є комп'ютерні технології моделювання, які застосовують метод скінченних елементів, пріоритет залишається за експериментальними дослідженнями, завдяки яким і зафіксовано більшість якісних ефектів орбітального штампування, відображених в статті. Особлива увага приділялась ефективному позитивному застосуванню якісних ефектів штампування обкочуванням. Зокрема, такий ефект як виникнення зони дії напружень розтягування може енергоефективно використаний для утворення центральної порожнини. А ексцентричне прикладання зусилля деформування можливо ефективно урівноважити, що не тільки зменшить навантаження на обладнання, а і створить основу для низки оригінальних технологій. Відповідні технологічні і конструкторські рішення, що базуються на результатах наукових і експериментальних досліджень процесу, запроваджуються у виробництво і закладені в основу при написанні цієї статті.

Ключові слова: *орбітальне штампування, штампування обкочуванням, модель пластичних деформацій, метод скінчених елементів, середні питомі зусилля, зусилля деформування, осередок деформації.*

Розвиток процесів деформування інструментом, що локально деформує заготовку і сукупно призводить до об'ємної формозміни, постійно доповнює виробничу практику новими технологічними можливостями. Як правило характерні особливості штампування обкочуванням покладені в основу процесу базуються на особливостях процесу і вигідно відрізняються від традиційних методів обробки тиском з точки зору енергоефективності. Останнім часом запроваджені технологічні варіанти класичної схеми орбітального штампування як у напряму розширення технологічних схеми деформування, так і спеціального обладнання [1, 2, 3, 4]. Відповідно, що ці особливості потребують наукового і технологічного узагальнення для широкого практичного застосування.

Мета статті – аналіз на конкретних прикладах технологічних переваг орбітального штампування; – виявлення фізичної сутності ефективності процесу одночасно з аналізом конструкторських рішень обладнання, що його реалізує; – виділення особливостей багатогранного протікання процесу та його застосування з точки зору енергоефективності.

Сутність методу орбітального штампування полягає в тому, що активний інструмент, який має конічну або більш складну формоутворюючу поверхню, шляхом багаторазової циклічної силової дії об'ємно формує заготовку. Деформування верхньої зони відбується локально, але поступово охоплює поверхневий шар заготовки, товщина якого залежить від кінематичних характеристик процесу та геометрії деталі.

Спрощена схема процесу представлена на рис.1 на прикладі осаджування циліндричного зразка. Осаджування циліндричної заготовки 1 виконується між активним інструментом 2, що має конічну робочу поверхню, та опорним інструментом 3 з плоскою робочою поверхнею, але в разі виконання операції об'ємного штампування інструмент 3 має порожнину, що відповідає формі виробу і яка буде заповнюватись в результаті штампування. Активний інструмент 2 виконує орбітальний рух відносно вершини *O*. Найбільш простим в реалізації є круговий обертальний [1, 2] рух, при якому активний інструмент буде обкачуватися по заготовці 1. При цьому кут нахилу осі OZ_1 активного інструмента 2 відносно вертикальної осі *OZ* складає кут γ. Деформування заготовки проходить при осьовому зближенні інструментів 2 і 3 та орбітальному русі обкочування активного інструмента 2. Закон зміни кута γ та рух осі OZ_1

активного інструменту 2 можуть бути змінними, що забезпечить і різноманітний вид орбітального руху (від руху по колу до спірального або прямолінійного тощо). За таких умов контакт між активним інструментом 2 та заготовкою 1 відбувається по частині торцевої поверхні заготовки площею F , яка є плямою контакту (затемнена область на рис.1) . Треба зауважити, вид орбітального руху задається відповідним механізмом обладнання [1, 2], який може бути доволі складним як в реалізації, так і в обслуговуванні. Багаторічний практичний досвід доводить, що найбільш затребуваним і простим в реалізації є механізм з постійним кутом γ та рухом по колу [3].

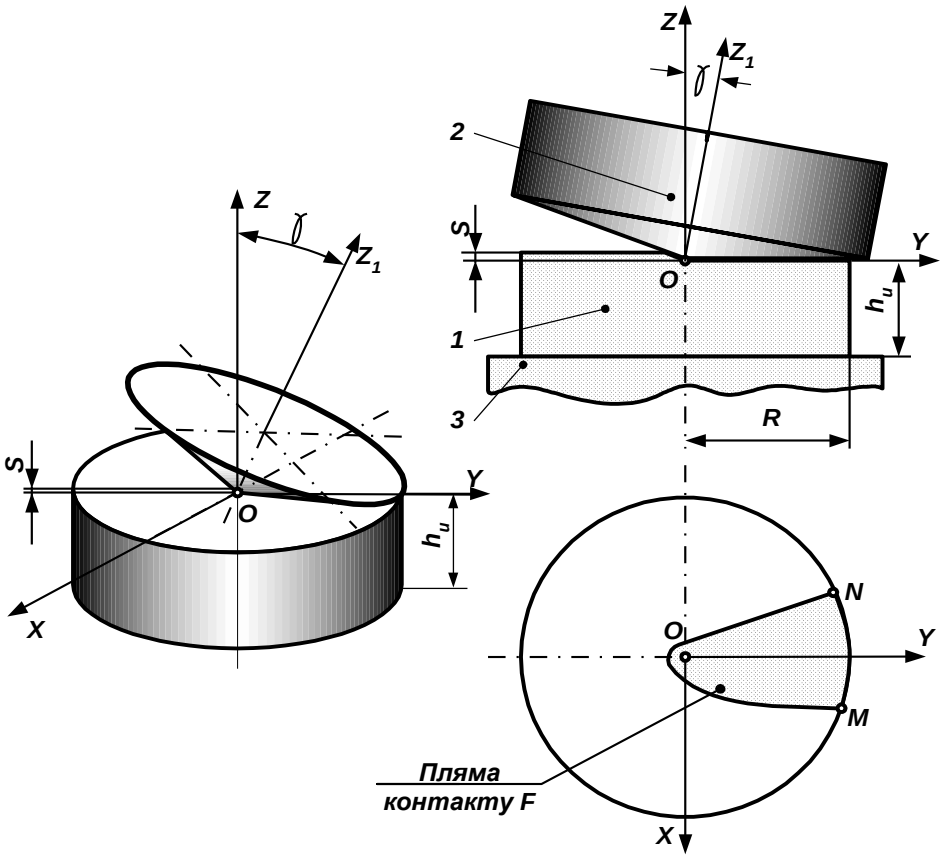


Рис. 1. Схема процесу осаджування обкочуванням циліндричного зразка:
(1– заготовка; 2 – активний інструмент; 3 – опорний інструмент; h_u – поточна висота заготовки; R – поточний радіус заготовки; NM – дуга осередку контакту; інші позначення надані в тексті)

Для демонстрації наочності протікання процесу, застосовують коефіцієнт λ, який визначається співвідношенням площі плями контакту F до площі всього торця заготовки $F_T = \pi R^2$ та наглядно демонструє виграш по зусиллю. Коефіцієнт λ залежить від групи геометричних та кінематичних параметрів [4, 5]:

$$\lambda = \frac{F}{F_T} = \sqrt{\frac{S}{\pi^2 R \cdot tg\gamma}}, \quad (1)$$

де υ – швидкості вздовж осі заготовки;

n – частота обкочування;

S – узагальнений параметр – подача на оборот (рис. 1)

$$S = \frac{v}{n}. \quad (2)$$

Зона пластичної деформації при переміщенні плями контакту, зокрема по колу, охопить увесь верхній об'єм заготовки 1. Відповідно, що для проведення пластичного деформування, необхідно прикласти до інструментів 1 і 3 осьове зусилля P для їх зближення, та момент обкочування M до активного інструменту 2.

При цьому вісь активного інструменту нахилена на кут γ та виконує обертальний рух відносно осі заготовки з одночасним обертанням самого активного інструменту в протилежному напряму. Швидкості обертання осі активного інструменту та самого інструменту, як правило, узгоджуються умовою мінімального тертя між активним інструментом і заготовкою на стільки, що виникає враження що інструмент обкочується но поверхні заготовки. Можлива ситуація, коли активний інструмент не має власного приводу, а обкочується лише завдяки контактним силам тертя. Така обробка має низку як позитивних, так і моментів, які, на перший погляд, зменшують ефективність протікання процесу, але можуть бути використані позитивно і впливати на енергоефективність процесу.

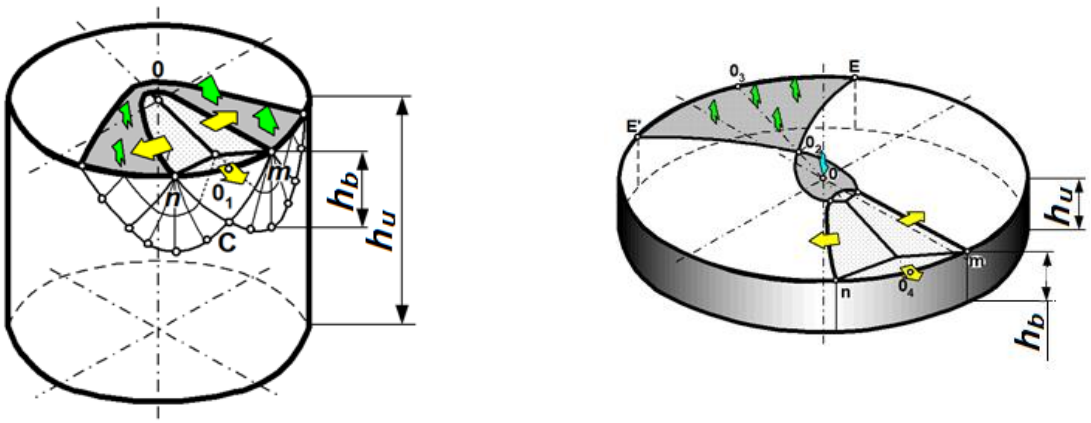
Однією з основних переваг штампування обкатуванням є 5…20-ти кратне зниження зусилля осьового навантаження, яке оцінюється коефіцієнтом λ, та впливом умов тертя на контактній поверхні.

В даному випадку під впливом умов тертя на контактній поверхні слід вважати вирахування енергетичних витрат на здолання сил тертя при пластичній течії матеріалу в локалізованому осередку, що в кінцевому результаті визначає значення середніх питомих зусиль $p_{сер}$, та задає енергетичні переваги процесу. Необхідно зауважити, що енергетичний виграш на здолання сил тертя в локалізованому осередку робить процес орбітального штампування енергоефективним в порівнянні з традиційними.

Дійсно, за літературними даними значення середніх питомих зусиль $p_{сер}$ рекомендуються в широкому діапазоні значень [6, 7]. Не зважаючи на масове застосування комп'ютерних програм розрахунків параметрів процесів середні питомі зусилля залишаються серед основних характеристик, в тому числі, і при застосуванні цифрових технологій, і при виконання найпростіших технологічних розрахунків. Це стосується як аналітичних, так і експериментальних визначень. Така ж картина має місце і при конкретних моделюваннях напружено-деформованого стану. Окрім широкого діапазону підходів, спрощень, точності вимірювань, похибок тощо переважна більшість результатів достовірні, а відмінності в результатах пояснюються неповним врахуванням ефектів штампування обкочуванням. Зокрема, розбіг значень середніх питомих зусиль може пояснюється тим, що в кожному випадку діють відмінні схеми протікання пластичних деформацій та утворення напружено-деформованого стану [8] .

В [9] запропоновано розглядати межі дії моделі пластичних течій при штампуванні обкочуванням в комплексній залежності від відносних розмірів заготовки, кінематичних параметрів, а головне, на підставі якісних ефектів. Умовно розглянуто два варіанти, які визначають приналежність до відповідної моделі, зокрема: - модель пластичних течій у «високому» зразку; - модель пластичних течій у «тонкому» зразку. При цьому визначення «високий» чи «тонкий» зразок залежить не від конкретних розмірів зразка і не від його відносних розмірів, а визначається зоною розповсюдження пластичних деформацій по висоті. Якщо пластична зона (h_b) не охоплює всю висоту зразка (h_u), то це «високий» зразок, якщо пластичні деформації по всій висоті – «тонкий». Надалі не будемо вживати лапки в цих назвах.

На рис. 2 представлене графічне відображення дії моделей пластичних течій в товстій (рис. 2, *а*) і тонкий (рис. 2, *б*) заготовках. Як зазначалось вище в основу будови моделі були покладені якісні моменти формоутворення, що спостерігались при обкатуванні.

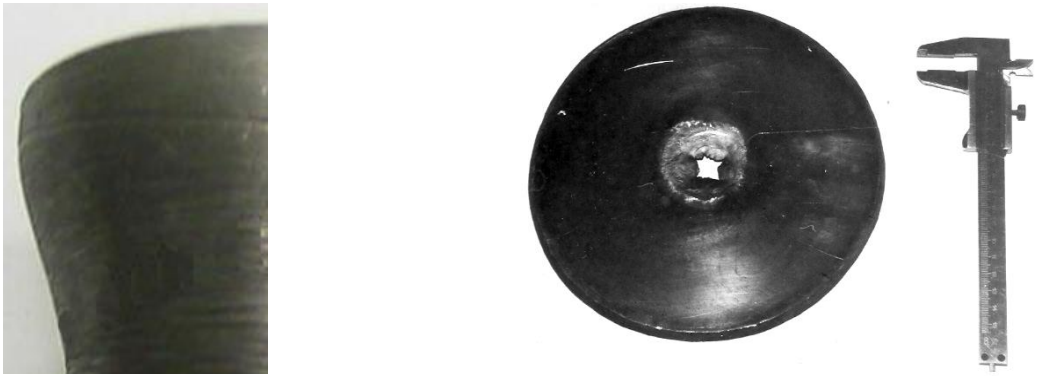


а *б*

Рис. 2. Моделі пластичних течій в заготовках при осаджуванні обкочуванням циліндричного зразка (h_b – висота зони пластичних деформацій; h_u – висота зразка; *nm* – дуга пластичного осередку контакту):

а – для високої заготовки; *б* – для тонкої заготовки

Характерною ситуацією при обробці обкочуванням високої заготовки є набуття нею форми «гриба» (див. рис. 3, *а*) (стрижня із стовщенням), що є результатом пластичних деформацій в контактному осередку в тангенціальних і радіальному напрямах вздовж жовтих стрілок. І поза контактних деформацій (зелені стрілки) в осьовому напряму. Шляхом утворення балансу робіт на здолання зусиль перешкод в цій моделі знаходиться енергетичні витрати кожної складової та визначаються середні питомі контактні зусилля [9].



а *б*

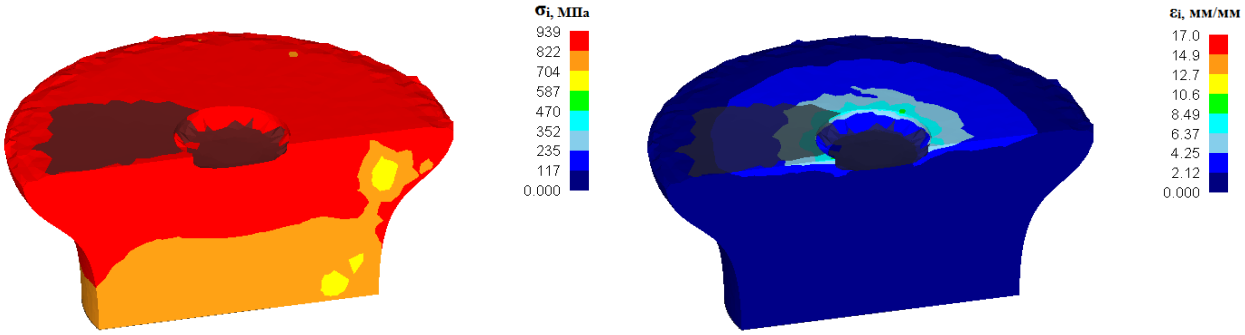
Рис. 3. Прояв характерних особливостей пластичних деформацій у вигляді радіального стовщення або стоншення і руйнування центральної частини заготовки при осаджуванні обкочуванням циліндричного зразка:

а – для високої заготовки; *б* – для тонкої заготовки

Характерною рисою при обкочуванні тонкої заготовки є утворення поза контактної порожнини та розривів центральної частини від дії напружень розтягу (це один з небагатьох випадків утворення схеми плоского розтягу при обробці металів тиском) (див. рис. 3, *б*). Така особливість пояснюється дією на поза контакту частину заготовки тангенціальної течії металу із контактного осередку. Поза контактна частина буде сприймати згинання відносно точки O_2, відносно якої (як при згинанні) зовнішня половина тіла заготовки буде сприймати напруження стискання, а внутрішня – розтягування.

Зважаючи на характерні особливості проходження притаманних пластичних деформацій при штампуванні обкочуванням високої і тонкої заготовки можливо підвищити енергоефективність процесу шляхом закладання параметрів в ефективному інтервалі або застосуванні інших якісних ефектів. Зокрема, фланцева частина високої заготовці почне набувати грибоподібної форми ще до утворення контакту з формуючою порожниною штампу. Тому при

виготовлені фланцевого виробу треба застосовувати заготовку, яка спрямовано забезпечує параметри протікання процесу як для високої. На рис.4 представлені проміжні результати моделювання методом скінченних елементів осаджування (40% висотної деформації) циліндричної заготови та розподіл напружень і деформацій. З формозміни видно, що циліндрична заготовка набуває фланцевої форми. Також треба виділити технічні рішення авторів [1] при розробці технологічного процесу виготовлення конічної шестерні.



а *б*

Рис. 4. Результати моделювання методом скінчених елементів осаджування високої заготовки на 40% висотної деформації:

а – розподіл інтенсивності напружень; *б* – розподіл інтенсивності деформацій вздовж вертикальної площини по лінії *0-0*$_1$ (див. рис. 2, *а*)

Моделювання підтверджує наступні якісні ефекти осаджування обкочуванням:

- постійність радіальних напружень вздовж осередку деформацій в залежності від величини контактного осередку;
- наявність поза контактної зони деформацій у вигляді шарніру пластичності, що протилежить контактній, та наявність в ній напружень розтягування;
- відповідність зовнішньої формозміни осаджування обкочуванням, що отримана експериментальним шляхом, в перше чергу це стосується початкової відсутності деформування нижньої частини заготовки та утворення специфічної грибоподібної форми.

Застосування другого якісного моменту, який характерний при осаджуванні тонкої заготовки, спрямовує на корисне використання цієї ситуації в якості варіанту формоутворення центральної порожнини або отвору. Для утворення порожнини потрібні зменшені зусилля і енергетичні витрати оскільки пуансон, що буде утворювати порожнину буде занурюватись в осередок, де діють напруження розтягування.

Лідером на ринку обладнання для обладнання для орбітального штампування є преси моделей T200, T400, T630 "SCHMID. Heinrich Schmid Maschinen-und Werkzeugbau AG. FEINTOOL GROUP", які мають універсальне призначення та широкі технологічні можливості. Відмінною особливістю є оснащення преса додатковим приводним пуансоном, розташованим в корпусі активного рухомого інструменту. З одного боку, це надає нові технологічні можливості по формоутворенню центральної порожнини, при вилученні деталі з штампу або при прошиванні центрального отвору. З іншої сторони, перелічені операції виконуються в положенні, коли рухомий активний інструмент займає суто вертикальне положення. Забезпечити одночасне штампування обкочуванням з нахилом осі на кут γ та центральне занурення пуансону на цьому обладнанні конструкційно неможливо.

Запропоновано оригінальний механізм обкочування [10]. Механізм (рис. 5, *а*) складається з корпусу 1, в якому встановлений на опорному 2 і радіальних підшипниках 3 пресувач 4. Пресувач 4 обертається від приводу (на рис. 5 не показаний). Пресувач 4 має внутрішню порожнину з нахиленої, щодо зовнішніх поверхонь, віссю. У внутрішній порожнині пресувача 4 на опорному 5 і радіальному 6 підшипниках встановлений з можливістю обертання рухомий

активний інструмент 7, що має центральний наскрізний отвір. У корпусі 1 вздовж осі встановлений привод прошивного пуансону 8 (в даному випадку у вигляді гідравлічного циліндра) з можливістю забезпечення руху пуансону 9 вздовж осі механізму. Пуансон 9 проходить через центральний отвір активного інструменту 7, причому в неробочому стані, коли штампування не відбувається, пуансон 9 виступає за крайню робочу кромку рухомого інструменту 7 на величину m. Для забезпечення роботи пуансона 9 протягом періоду штампування величина його переміщення *k* вздовж осі повинна бути більшою ніж сумарна величина виступу пуансону за крайню робочу кромку рухомого пуансона m і робочого ходу інструменту 7 вздовж осі нерухомого штампу 10 за період висотної обробки заготовки 11.

Перед тим як рухомий інструмент 7 утворить контакт з заготовкою, пуансон 9, який виступає за робочу поверхню рухомого інструменту 7 на величину m, спочатку фіксує заготовку 11. Після притискання заготовки 11 проходить процес пластичного деформування до кінцевих розмірів деталі 12 як із сторони рухомого інструменту 7, так і пуансону 9.

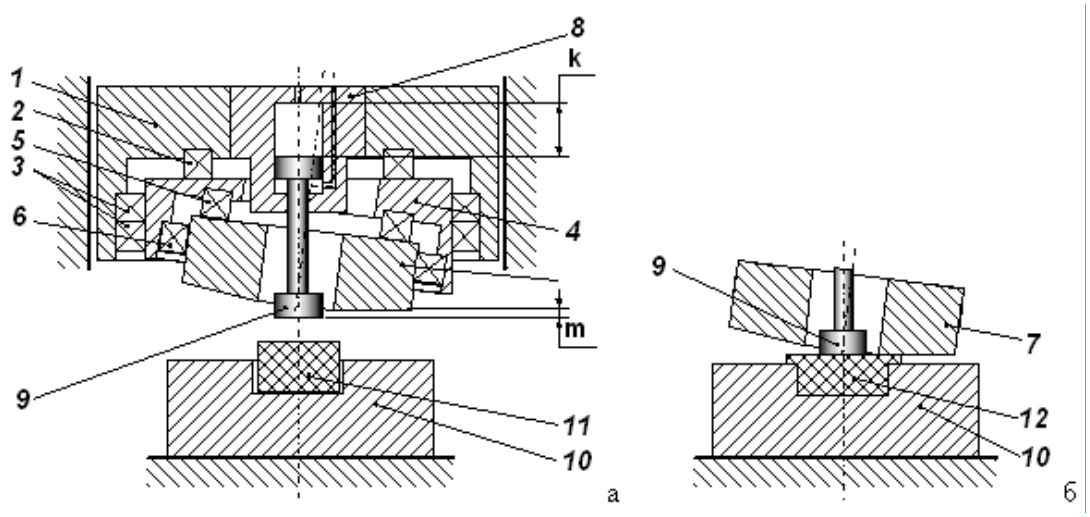


Рис. 5. Конструкція механізму обкочування з пристроєм для центральної фіксації та прошивання заготовки (1 – корпус; 2, 5 – опорний підшипник; 3, 6 – радіальний підшипник; 4 – пресувач; 7 – активний інструмент; 8 – гідравлічний циліндр; 9 – пуансон; 10 – нерухомий штамп; 11 – заготовка з початковими розмірами; 12 – виріб з кінцевими розмірами; m – регульована величина виступу пуансону):

а – початкова стадія обробки; *б* – кінцева стадія

Робота пристрою, що показаного на рис.5 і сам технологічний процес змодельовані на прикладі об'ємного штампування обкочуванням деталі «шестерня насосу», яка показана на рис. 6. Схема процесу при моделюванні показана на рис. 7, *а*. Деталь має розвинуту фланцеву частину та крізний центральний отвір, матеріал 0,35 % вуглецю та 1 % хрому, використовується відокремлена від прутка циліндрична заготовка. За запропонованою технологією (див. рис. 7, *а*) отвір в заготовці 1 з розмірами D_0 та H_0 розташованій на опорному інструменті 4 суміщено прошивається центральним приводним пуансоном 3 діаметром *d* на глибину 2 *мм*. На цей момент заготовка 1 надійно зафіксовала від зміщень відносно вертикальної осі в момент дотику активним інструментом 2. Далі занурення центрального пуансону 3 проводиться одночасно із штампуванням обкочуванням фланцевої частини під впливом активного інструменту 2 .

Протікання формоутворення за схемою на рис. 7, *а* має характерні ознаки, що притаманні штампуванню обкочуванням, про що свідчать графіки розподілу зусиль деформування по ходу переміщення на прошивному пуансоні 3 та активному інструменті 2. Графіки зусилля-переміщення представлені на рис. 8. Для з'ясування закономірностей залежності енерго-силових параметрів процесу від відносних розмірів циліндричної заготовки проводилась група

моделювань для різних співвідношень розмірів заготовки. В представлених результатах моделювання проводилось для випадку $H_0/D_0 = 0,5$; $d/D_0 = 0,4$. При таких конкретних співвідношеннях заготовки має місце неповне заповнення порожнини опорного інструменту (виділено червоною лінією на рис. 7, *б*), що вказує на інтенсивні радіальні деформації з під прошивного пуансону, але при інших співвідношеннях H_0/D_0 та d/D_0 спостерігається вже повне заповнення порожнини. З іншої сторони інтенсивні радіальні напрями течії матеріалу в майбутньому доречно використати для формоутворення зубців колеса.

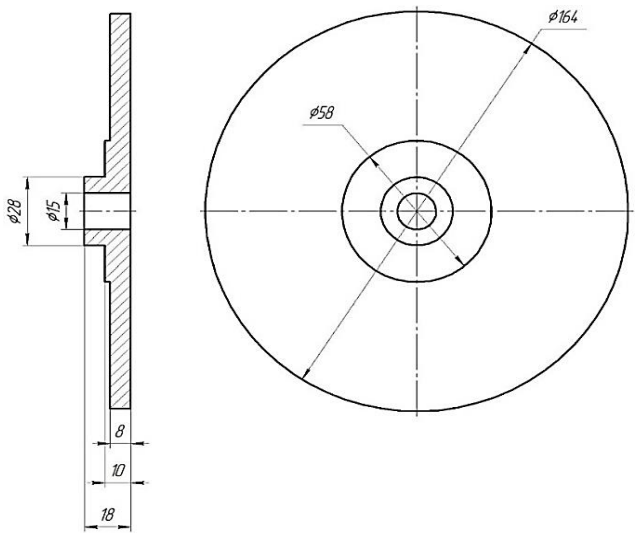
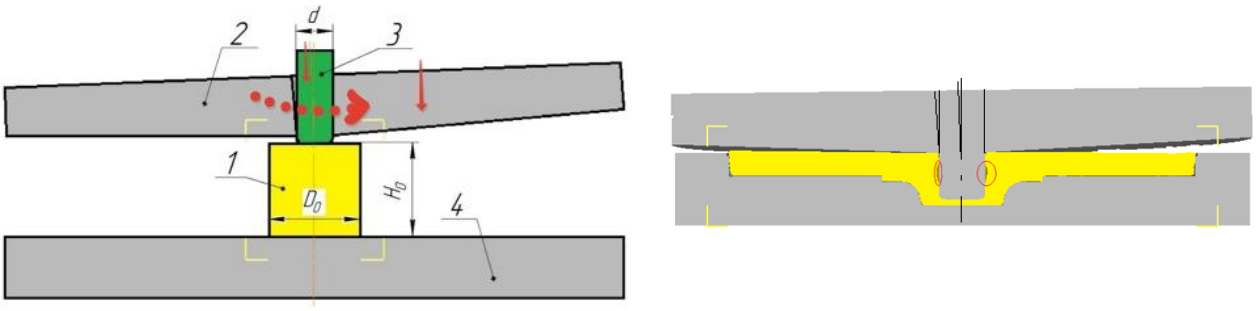


Рис. 6. Креслення деталі «шестерня насосу»

На графіку (рис.8) можна виділити п’ять характерних зон: 1 – початковий момент прошивання, коли зусилля на пуансоні стрімко зростає; 2 – стала фаза прошивання, при який зусилля прошивання приблизно постійне; 3 – початковий момент формоутворення фланця штампуванням обкочуванням, коли зусилля на активному інструменті зростає; 4 – стала фаза штампування обкочуванням з одночасним прошиванням; 5 – кінцева стадія процесів штампування обкочуванням та прошивання, коли зменшуються товщини заготовки та зростає робота по здоланню сил тертя.

Практично всі графічні залежності відповідають класичним закономірностям обробки металів тиском, але, на перший погляд, дивним здається падіння зусилля на пуансоні починаючи з зони 3 (лінія синього кольору на графіку). Цьому є фізичне пояснення, яке базується на врахуванні дії якісних моментів моделі пластичних течій в тонкий заготовці (див. рис. 2, *б*). Річ в тім, що коли починається процес штампування обкочуванням (зона 3) в центральній частині заготовки утворюється осередок дій напружень розтягування, що і викликає зменшення зусилля прошивання.



а *б*

Рис. 7. Схема процесу та результати формоутворення деталі «шестерня насосу»:
а – схема процесу моделювання; *б* – результати формоутворення деталі «шестерня насосу»

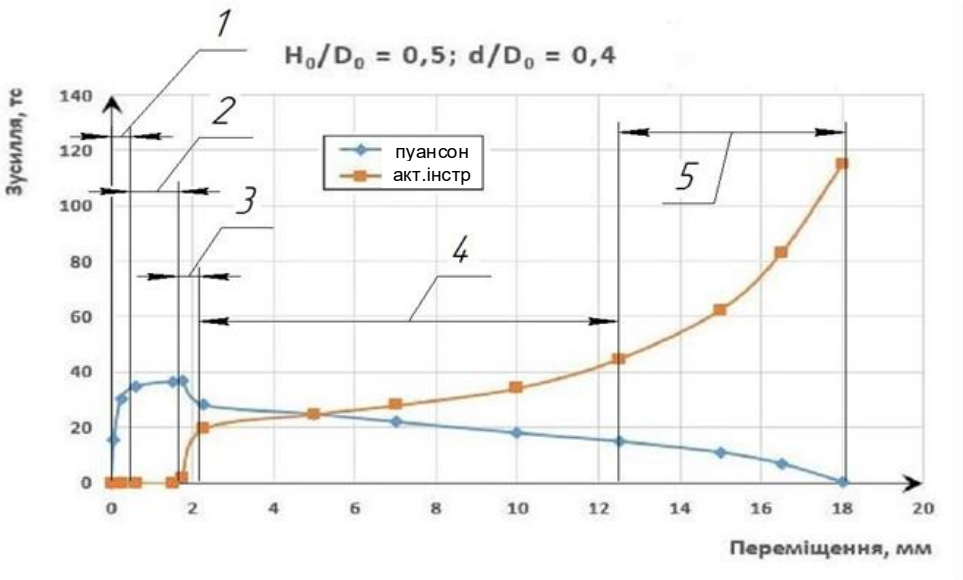


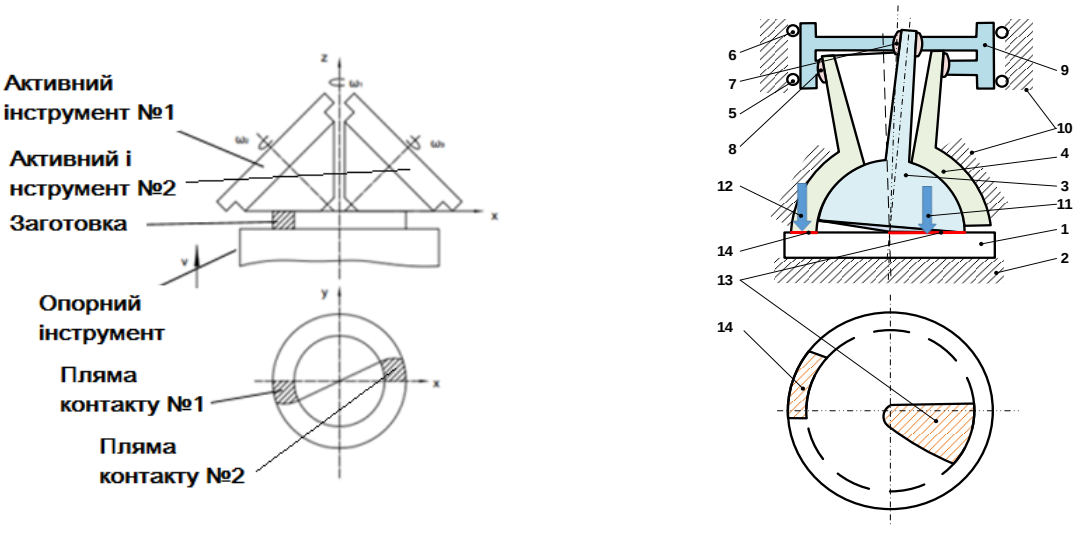
Рис. 8. Графіки зусилля-переміщення на пуансоні при прошиванні заготовки та на активному інструменті при штампуванні обкочуванням за результатами моделювання процесу

Таким чином спрямоване утворення в центральній частині заготовки напружень розтягування при штампуванні обкочуванням, що в деяких випадках може привести до браку та навіть до руйнувань центру деталі, можливо корисно використати з метою утворення порожнини. Енергетичні витрати формування порожнини в зоні утворення напружень розтягування є меншими.

Одним з недоліком орбітального штампування є ексцентричне прикладання зусилля, що накладає додаткові умови на закладання міцності при проєктуванні і виготовлення спеціалізованого обладнання, що, не зважаючи, на зменшення зусилля деформування випливає на зростання його матеріалоємності. Це питання вирішується використанням при штампуванні обкочуванням симетричних схем навантаження із задіянням декількох активних інструментів [11, 12]. Наприклад, в [12] розглянутий механізм обкочування, який має два приводних активних інструменти (рис. 9, а). Активні інструменти мають діаметрально протилежне розташування і при виконанні орбітальних рухів утворюють дві плями контакту з поверхнею заготовки, яка розміщується на опорному інструменті. Результатом такої подвійної дії є взаємне урівноваження технологічних зусиль відносно центру заготовки (осі обладнання) по кожній плямі контакту. Серед особливостей такої конструкції слід відзначити, що кут нахилу осі обкочування $\gamma \approx 45^o$, що може бути недостатнім для виконання деяких операції штампування обкочуванням та створенням випадків аналогічних до прокатування від дії недостатніх сил тертя.

Другий механізм має всі атрибути механізму обкочування класичної конструкції та рекомендовані значення кута γ. Заготовка 1 розміщується на опорному інструменті 2 та обкочується одночасно як активним внутрішнім інструментом 3, так і зовнішнім активним інструментом 4. На радіальних підшипниках 5, 6 встановлений з можливістю обертання ротор 9, який має дві діаметрально протилежні ексцентрикові розточки, в яких закріплені два сферичні підшипники 7, 8. Від дії обертального руху ротора 9 на активні інструменти 3, 4 утворюється їх орбітальний рух обкочування. Механізм подвійного обкочування змонтований в корпусі 10, який є опорою для активних інструментів 3, 4, що спитаються один на одного. Таким чином утворюються два деформуючі зусилля 11, 12 від дії кожного з активних інструментів. Внутрішнє зусилля 11 від активного інструменту 3 з утворенням плями контакту 13 та периферійне зусилля 11 від активного інструменту 2 з утворенням плями контакту 14. Як видно зусилля 11, 12 взаємно урівноважують одне одного відносно центру заготовки (осі обладнання) по кожній

плямі контакту 13, 14. Серед особливостей такого технологічного процесу є можливість формування на межі дій активних інструментів 2, 3 висотного виступу на торцевій поверхні деталі 1, що значно розширює технологічні можливості пристрою.



а *б*

Рис. 9. Механізми обкочування, які мають два приводних активних інструменти, що створюють врівноважені деформуючі зусилля (1 – заготовка; 2 – опорний інструмент; 3 – внутрішній активний інструмент; 4 – зовнішній активний інструмент; 5, 6 – підшипники; 7, 8 – сферичні підшипники; 9 – ротор; 10 – корпус; 11, 12 – деформуючі зусилля; 13, 14 – плями контакту):

а – за [12]; *б* – авторська розробка

Другий механізм має всі елементи механізму обкочування класичної конструкції та рекомендовані значення кута γ. Заготовка 1 розміщується на опорному інструменті 2 та обкочується одночасно як зовнішнім активним інструментом 3, так і внутрішнім активним інструментом 4. На радіальних підшипниках 5, 6 встановлений з можливістю обертання ротор 9, який має дві діаметрально протилежні ексцентрикові розточки, в яких закріплені два сферичні підшипники 7, 8. Від дії обертального руху ротора 9 на активні інструменти 3, 4 утворюється їх орбітальний рух обкочування. Механізм подвійного обкочування змонтований в корпусі 10, який є опорою для активних інструментів 3, 4, що спитаються один на одного. Таким чином утворюються два деформуючі зусилля 11, 12 від дії кожного з активних інструментів. Внутрішнє зусилля 11 від активного інструменту 3 з утворенням плями контакту 13 та периферійне зусилля 11 від активного інструменту 2 з утворенням плями контакту 14. Як видно зусилля 11, 12 взаємно урівноважують одне одного відносно центру заготовки (осі обладнання) по кожній плямі контакту 13, 14. Серед особливостей такого технологічного процесу є можливість формування на межі дій активних інструментів 2, 3 висотного виступу на торцевій поверхні деталі 1, що значно розширює технологічні можливості пристрою.

ВИСНОВКИ

1. Розглянуті в статті варіанти застосування технологій і обладнання операцій орбітального штампування обкочуванням запроваджені чи можуть бути використані на виробництві з метою подальшого підвищення його енергоефективності.

2. Такий ефект як утворення зони дії напружень розтягування може енергоефективно використаний для утворення центральної порожнини, при цьому операція прошивання центрального отвору протікають суміщено і при зусиллях в 1,5…2 менших ніж при традиційному процесі.

3. Ексцентричне прикладання зусилля деформування, що притаманне штампуванню обкочуванням, можливо ефективно урівноважити безпосередньо конструкцією обладнання,

що не тільки зменшить навантаження на станину, а і створить основу для низки оригінальних технологій.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. G. Samołyk. Investigation of the cold orbital forging process of an AlMgSi alloy bevel gear. Journal of Materials Processing Technology 213 (2013) 1692– 1702. journal home page: www.elsevier.com/locate/jmatprotec. 1+1. ASM Handbook, Volume 14A: Rotary Forging Metalworking: Bulk Forming S.L. Semiatin, editor, pp. 179–182. DOI: 10.1361/asmhba0003990 .

2. Chou A.C.P., Chou P.C., Rogers H.C., Rotary forging, forming and forging, Vol 14, ASM Handbook formerly Metals Handbook, 9th ed., ASM International. 1988, pp. 176–179. www.asminternational.org.

3. Гожій С. П., Ландар Р.М., Носенко А.І. Класифікація обладнання для штампування обкочуванням. *Обробка металів тиском*. 2011. 1 (26). С. 209–214.

4. Yu, Z.; Chen, M.; Ma, C.; Luo, S.; Zhu, C. Numerical model simulation of the double-roll rotary forging of large diameter thin-walled disk. *Metals.* 2021. 11, p. 1767. https://doi.org/10.3390/met11111767.

5. Гожій С.П. Геометричні параметри штампування обкочуванням. *Праці Таврійської державної агротехнічної академії. Випуск 4. Прикладна геометрія та інженерна графіка*. Мелітополь. 2006. Том 33. С. 117–123.

6. Тітов В., Гожій С., Мироненко,В. Універсальна дослідна установка для пресування трубних заготовок. *Механіка та новітні технології*. 2022. 6 (1). https://doi.org/10.20535/2521-1943.2022.6.1.260002.

7. Han X., Hua L.. Effect of size of the cylindrical workpiece on the cold rotary-forging process. *Materials and Design. Elsevier*. 2009. 30, pp. 2802 – 2812.

8. Гожій С.П. Модель деформацій при осаджуванні обкочуванням високого циліндричного зразка. *Машинознавство.* 2009. 7 (145). С. 34-37.

9. Гожій С.П., Кліско А.В. Визначення роботи контактних сил тертя при штампуванні обкочуванням з врахуванням розподілу контактних напружень та зони пристування. *Journal of Mechanical Engineering NTUU "Kyiv Polytechnic Institute"*. 2010. 59. С. 83–87.

10. Пат. 15245, Україна, МПК B21D 37/00. Спосіб виготовлення деталей. Кривда Л.Т., Гожій С.П. № u20512822; заявл. 29.12.2005; опубл. 15.06.2006.

11. Wang Qi, Zhu Chun-dong, Liu Xin, Ma Rong-fei. Research on plastic deformation law and forming technology of rotary forging with multi-cone rolls. *Advances in Mechanical Engineering*. 2021. 13(4), pp. 1–15.

12. Shi Lei, Zhu Chun-dong, Liu Xin, Zhang Yi. Optimum design of the double roll rotary forging machine frame. *Mech. Sci*. 2020.11, pp. 101–114, https://doi.org/10.5194/ms-11-101-2020.

REFERENCES

1. G. Samołyk. Investigation of the cold orbital forging process of an AlMgSi alloy bevel gear. Journal of Materials Processing Technology 213 (2013) 1692– 1702. journal home page: www.elsevier.com/locate/jmatprotec. 1+1. ASM Handbook, Volume 14A: Rotary Forging Metalworking: Bulk Forming S.L. Semiatin, editor, pp. 179-182. DOI: 10.1361/asmhba0003990 .

2. Chou A.C.P., Chou P.C., Rogers H.C., Rotary forging, forming and forging, Vol 14, ASM Handbook formerly Metals Handbook, 9th ed., ASM International. 1988, pp. 176–179. www.asminternational.org.

3. Gozhii S.P., Landar R.M., Nosenko A.I. Classification of rolling stamping equipment. *Processing of Materials Working by Pressure*. Kramatorsk: DSEA. 2011. 1 (26), pp. 209-211. *(in Ukrainian).*

4. Yu, Z.; Chen, M.; Ma, C.; Luo, S.; Zhu, C. Numerical Model Simulation of the Double-Roll Rotary Forging of Large Diameter Thin-Walled Disk. Metals 2021, 11,1767. https://doi.org/10.3390/met11111767.

5. Gozhii S.P. Geometric parameters of rolling stamping. *Proceedings of the Tauri State Agricultural Technical Academy. Issue 4. Applied geometry and engineering graphics.* Melitopol. 2006. 33, pp. 117-123. (*in Ukrainian*).

6. Titov, V., Gozhii, S., Myronenko, V. Universal experimental installation for pressing pipe blanks. *Mechanics and New Technologies*. 2022. 6 (1). https://doi.org/10.20535/2521-1943.2022.6.1.260002. (*in Ukrainian*)

7. Han X., Hua L. Effect of Size of the Cylindrical Workpiece on the Cold Rotary-Forging Process. *Materials and Design. Elsevier.* 2009. 30, pp. 2802 - 2812.

8. Gozhii S.P. Model of deformations during rolling deposition of a tall cylindrical sample. *Mechanical engineering*, 2009. 7 (145), pp. 34-37. (*in Ukrainian*).

9. Gozhii S.P., Klisko A.V. Determination of the operation of frictional contact forces during stamping by rolling, taking into account the distribution of contact stresses and the sticking zone. *Journal of Mechanical Engineering. NTUU "Kyiv Polytechnic Institute"*. 2010. 59, pp. 83-87. (*in Ukrainian*).

10. Pat. 15245. Ukraine. B21D 37/00. The method of manufacturing parts. Kryvda L.T., Gozhii S.P. Bull. 6, 15.06.2006.

11. Wang Qi, Zhu Chun-dong, Liu Xin, Ma Rong-fei. Research on plastic deformation law and forming technology of rotary forging with multi-cone rolls. *Advances in Mechanical Engineering*. 2021. 13(4), pp. 1–15.

12. Shi Lei, Zhu Chun-dong, Liu Xin, Zhang Yi. Optimum design of the double roll rotary forging machine frame. *Mech. Sci*. 2020.11, pp. 101–114, https://doi.org/10.5194/ms-11-101-2020.

Gozhii S., Myronenko V. Prerequisites for the creation of energy-efficient technologies and equipment for orbital stamping by rolling.

Scientific studies of the processes and equipment of orbital rolling stamping are conducted at the Department of Aircraft Production Technology of the Scientific and Educational Mechanics and Mechanical Engineering Institute of the National Technical University of Ukraine "Ihor Sikorskyi Kyiv Polytechnic Institute" from the 70s of the last century to the present. During this time, sufficient experience has been accumulated in the creation of energy-efficient technologies and equipment for orbital stamping by rolling. All scientific developments are created on the basis of qualitative effects of the process and emphasize its unique possibilities and perspective of application. Given the fact that the modern tool for researching metal pressure processing processes is computer modeling technology that uses the finite element method, the priority remains experimental research, thanks to which most of the qualitative effects of orbital stamping reflected in the article were recorded. Special attention was paid to the effective positive application of the qualitative effects of rolling stamping. In particular, such an effect as the formation of a zone of action of tensile stresses can be energy-efficiently used for the formation of a central cavity. And the eccentric application of the deformation force can be effectively balanced, which will not only reduce the load on the equipment, but also create the basis for a number of original technologies. Appropriate technological and design solutions, based on the results of scientific and experimental research of the process, are introduced into production and laid as a basis for writing this article.

Keywords: *orbital stamping, rolling stamping, plastic deformation model, finite element method, average specific forces, deformation forces, deformation center.*

Гожий С. П., Мироненко В. А. Предпосылки создания энергоэффективных технологий и оборудования орбитальной штамповки обкатыванием.

Научные исследования процессов и оборудования орбитальной штамповки обкатыванием проводятся на кафедре технологии производства летательных аппаратов Научно-учебного механико-машиностроительного института Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского» с 70-х годов прошлого века до настоящего времени. За это время накоплен достаточный опыт создания энергоэффективных технологий и оборудования для орбитальной штамповки обкатыванием. Все научные разработки созданы на основе качественных эффектов процесса и подчеркивают его уникальные возможности и перспективу применения. Учитывая, что современным инструментом исследования процессов обработки металлов давлением являются компьютерные технологии моделирования, применяющие метод конечных элементов, приоритет остается за экспериментальными исследованиями, благодаря которым и зафиксировано большинство качественных эффектов орбитальной штамповки, отраженных в статье. Особое внимание уделялось эффективному положительному применению качественных эффектов штамповки обкатыванием. В частности, такой эффект, как образование зоны действия напряжений растяжения, может энергоэффективно использован для образования центральной полости. А эксцентричное приложение усилия деформирования возможно эффективно уравновесить, что не только снизит нагрузку на оборудование, но и создаст основу для ряда оригинальных технологий. Соответствующие технологические и конструкторские решения, основанные на результатах научных и экспериментальных исследований процесса, вводятся в производство и заложены в основу при написании настоящей статьи.

Ключевые слова: *орбитальная штамповка, штамповка обкатыванием, модель пластических деформаций, метод конечных элементов, средние удельные усилия, усилия деформирования, область деформации.*

Гожій Сергій Петрович – д-р техн. наук, доц., проф. НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського»
Gozhii Serhii – Doctor of Technical Sciences, Docent, Associate Professor, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute
Гожий Сергей Петрович – д-р техн. наук, доц., проф. НТУУ «КПИ им. И. Сикорского»
E-mail: s.godziy@kpi.ua
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2276-1225

Мироненко Віталій Анатолійович – аспірант, НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського»
Myronenko Vitalii – Praduate student, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute
Мироненко Виталий Анатольевич – аспирант, НТУУ «КПИ им. И. Сикорского»
E-mail: ll671563@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6624-3564

НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine
НТУУ «КПИ им. И. Сикорского» – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», г. Киев, Украина

Стаття надійшла до редакції 05.06.22 р.

УДК 621.7.043; 004.942 DOI: 10.37142/2076-2151/2022-1(51)177

Тарасов О. Ф.
Касьянюк О. С.
Грибков Е. П.
Бабаш А. В.
Коваленко А. К.

ПРОЕКТУВАННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЮ УСТАНОВКОЮ ДЛЯ ПРОЦЕСУ КРУЧЕННЯ ПІД ВИСОКИМ ТИСКОМ ПОРОЖНИСТИХ ЗАГОТОВОК

Розвиток промислових підприємств та впровадження технології інтернету речей у виробництві вимагають створення нових механізмів, для розробки яких необхідно використання сучасних компонентів з подальшим точним комп'ютерним керуванням процесом. В області обробки металів тиском такими механізмами можна вважати установки для кручення під високим тиском (КВТ, high pressure torsion, НРТ), оскільки цей процес набуває поширення завдяки отримуванню субмікроскопічної структури в заготовці та надзвичайно високої міцності матеріалу в результаті обробки. В той же час використання установок КВТ має суттєві обмеження, які обумовлюються значною кількістю параметрів, які можуть змінюватись нелінійно під час процесу деформації. Проблеми керування установкою вирішуються завдяки використанню автоматизованої систем керування (АСК) параметрами технологічного процесу. В статті наведена сутність нового процесу деформації порожнистих заготовок за допомогою кручення під високим тиском. Наведений опис експериментальної установки та використаних елементів керування. Цей технологічний процес представлено множинами подій та діяльностей, зв'язок між якими відображено у вигляді циклограми. На основі аналізу представленого технологічного процесу розроблена система моніторингу та АСК установкою. Розроблена логічна схема АСК, діаграма визначення складу установки з АСК для реалізації технології КВТ та діаграма компонентів її програмного комплексу. Представлено схемне рішення використання частотного перетворювача для приведення до руху механізму кручення. Для точного підрахування числа обертів механізму кручення використаний інкрементальний енкодер фірми Siemens та налагоджувальна плата STM32F4Discovery. Використання частотного електроприводу дозволило підвищити ефективність керування установкою. Розробка та використання подібних АСК для інших установок для обробки металів тиском дозволить гарантувати стабільний технологічний процес і необхідні фізичні властивості заготовок.

Ключові слова: *кручення під високим тиском, порожниста заготовка, установка, моніторинг, автоматизована система керування.*

Однією з найбільш актуальних проблем галузей машинобудування і авіабудування є збільшення надійності деталей і термінів їх роботи. Створення деталей з поліпшеними характеристиками надійності та довговічності вимагає проведення експериментів з різними матеріалами та методами їх формозміни та удосконалення процесів обробки матеріалів тиском (ОМТ). Необхідність створення нових матеріалів з характеристиками, що поєднують комплекс оптимальних властивостей та працюють у екстремальних умовах, призвела до розвитку процесів виготовлення матеріалів з субмікроскопічною структурою (СМК) [1, 2]. Для цього використовуються спеціальні схеми деформування, які дозволяють за низьких температур досягати великих пластичних деформацій зсуву. Найбільшого поширення набули два методи інтенсивної пластичної деформації (ІПД - severe plastic deformation, SPD): кручення під високим тиском і рівноканальне кутове пресування [1, 3].

Серед величезної різноманітності методів ІПД, доступних в даний час, кручення під високим тиском (КВТ, high pressure torsion, НРТ) є методом досягнення максимального впливу на структуру та механічні характеристики матеріалу [4]. Кручення під високим тиском [5] є одним з методів ОМТ, в процесі якого заготовки піддаються стисненню та одночасному крученню. Важливою особливістю процесу є значний гідростатичний тиск, що перешкоджає розтріскуванню під час деформації і майже не призводить до обмеження деформації, що застосовується. Незважаючи на те, що фундаментальні принципи цього процесу були запропоновані ще в 1935 році, обробка КВТ набула великого значення лише протягом останніх 20 років [3], коли було визнано, що цей процес деформування дає можливість отримувати СМК структуру в заготовці та досягати надзвичайно високої міцності матеріалу. Отже, цей метод також дозволяє використовувати ІПД для матеріалів середньої та високої міцності навіть за низьких

температур. Більш того, метод КВТ досить простий для реалізації, що робить його надійним та економічним у порівнянні з іншими процесами ІПД. Але метод КВТ не має поширеного застосування, тому що розміри і форма деталі обмежені схемою деформування. Зміна схеми деформування при КВТ шляхом переходу до іншого типу заготовок забезпечує розширення технологічних можливостей процесу впливу на заготовку з метою її формозміни, отримання СМК структури і підвищених механічних характеристик.

Процес використовують для деформування надміцних сплавів на основі алюмінію, титану, магнію, створенні композитів та інших архітектурних матеріалів. Наприклад, в роботі [4] продемонстровано виготовлення з нанодроту Nb_2O_5 і порошку Al нового нанокомпозиту з металевою матрицею з суттєво покращеною міцністю відносно чистого Al. Системи для яких потрібен високий рівень надійності потребують якості матеріалу та його службових властивостей, наприклад, високої електропровідності [6]. В цій роботі представлено використання технологій порошкової металургії та КВТ для виготовлення надміцного пластичного нанокомпозиту Cu та Cu-CNT для виробництва міцних, провідних і пластичних композитів з металевою матрицею. Медична та авіаційна промисловості потребують якісних та міцних виробів з алюмінієвих, титанових та інших сплавів. В роботі [7] представлено розробку нового матеріалу з цих сплавів за допомогою КВТ. В роботі [8] показано покращення матеріалу з сплаву TiAlFeCoNi з використанням технологічного процесу КВТ для створення якісних виробів медичного призначення.

Однак перспективи використання КВТ як промислового методу мають суттєві обмеження. Це зумовлено малими розмірами оброблюваних заготовок і низькою стійкістю інструменту внаслідок надзвичайно високих навантажень на нього. Ще однією проблемою використання КВТ є керування та моніторинг великої кількості параметрів, які можуть змінюватись нелінійно під час процесу деформації. Цю проблему може вирішити АСК установки для проведення технологічного процесу КВТ, яка розглядається в даній роботі.

Одночасно, розвиток та вдосконалення промислового виробництва потребує безперервного збільшення продуктивності машин та агрегатів, підвищення якості продукції, зниження собівартості. Це можливо на основі створення нового технологічного обладнання для реалізації нових сучасних технологій. Для більш якісного керування технологічним процесом необхідні системи для контролю і управління установками, які використовуються для його реалізації. Ефективний контроль неможливий без впровадження сучасних систем управління, як автоматизованих, так і автоматичних, які працюють без участі людини-оператора. Особливо це актуально, коли є велика кількість параметрів для керування в процесі деформування.

Для нової установки кручення під високим тиском порожнистих заготовок **(**КВТ ПЗ) необхідно реєструвати кінематичні параметри інструменту та параметри силового впливу на заготовку та керувати процесом деформування: коригувати силу деформації, момент і швидкість кручення інструменту залежно від необхідної форми і властивостей заготовки. Автоматизація технологічного процесу дозволить отримувати показники з датчиків та коригувати параметри навантаження заготовки. Це також дозволить налаштувати нелінійні режими деформування для кращого формування СМК структури матеріалу заготовки.

Важливою частиною установки є електропривод, який повинен забезпечувати необхідний для технології режим роботи. Застосування сучасних комплектних електроприводів, а також досягнення в мікропроцесорній техніці робить можливим застосування різних законів керування асинхронним електродвигуном для виконання певних задач виробництва та автоматизації.

Технологічний процес пресування з одночасним крученням вимагає забезпечення точної кількості обертів механізму кручення. Для вирішення даної задачі необхідно розробити систему керування механізму кручення зразку при його одночасному пресуванні на основі сучасного комплектного електропривода, який здатний забезпечити необхідну точність позиціонування. Для підрахунку кількості обертів механізму кручення використовується мікропроцесорний комплекс, а саме налагоджувальна плата STM32F4Discovery [9].

Таким чином, завдяки автоматизації керування обладнанням можливо в реальному часі змінювати вихідні параметри заготовки для різного майбутнього застосування. При цьому, автоматизація керування дозволить зменшити вплив людського фактору на процес деформування та зменшити кількість помилок.

Комп'ютери та програмне забезпечення активно використовуються при автоматизації технологічних процесів для зберігання інформації, розрахунків за типовими методиками, підготовки текстової та графічної документації. Необхідність скорочення термінів та підвищення якості проектування призвела до появи програмних продуктів, що дозволяють швидко аналізувати та корегувати технологічні процеси на автоматизованих робочих місцях. Постійно удосконалюється концепція об'єднання систем автоматизованого проектування, підготовки виробництва та автоматизації самого виробництва. У ній результати автоматизованого проектування перетворюються на програми автоматизованого керування технологічним обладнанням та контролю якості. Мережева передача результатів проектування та технології створення інформаційних двійників у виробництві дозволила прискорити процес виконання замовлень.

Для якісної розробки автоматизованої системи керування (АСК) використовується технологія MBSE [10], основана на загальних принципах системної інженерії, візуальні засоби опису систем, такі як мова моделювання систем (systems modeling language, SysML) та уніфікована мова моделювання (unified modeling language, UML) для розробки програмного забезпечення [11, 12]. SysML є предметно-орієнтованою мовою моделювання систем. Вона підтримує визначення, аналіз, проектування, перевірку та підтвердження відповідності широкого спектру систем. SysML спочатку розроблявся в рамках проекту специфікації з відкритим вихідним кодом і має відкриту ліцензію для поширення та використання. Як мова, SysML є розширенням частини мови UML. UML є мовою широкого профілю, це відкритий стандарт, що використовує графічні позначення для створення абстрактної моделі системи. UML був створений для визначення, візуалізації, проектування та документування програмних систем. Наприклад, в роботі [11] представлено моделювання стратегії перемикання передач і керованості системи на основі SysML та проведено аналіз системних вимог, проектування та наведена розробка структурних моделей, моделі поведінки та інші моделі. Таким чином, функціональність результатів проектування перевіряється на більш ранній стадії життєвого циклу розробки продукту. Переваги використання SysML для проектування складних систем для промисловості представлено також в роботі [13], де описано сучасний стан аналізу безпеки системи на основі моделей (model-based safety analysis, MBSA) та продемонстровано адаптації його до сучасного рівня техніки, які включають пропозицію щодо інтеграції дерев несправності компонентів (component fault trees, CFT) з внутрішніми блок-схемами та діаграмами діяльності SysML.

Разом з АСК реалізації технологічного процесу повинна використовуватися система моделювання для розробки технології, проектування технологічного оснащення. Одним із сучасних засобів моделювання є багатофункціональна CAE-система Abaqus [14]. Abaqus являє собою набір програмного забезпечення для моделювання технологічного процесу за допомогою методу скінченних елементів. Продукти Abaqus використовуються з відкритим вихідним кодом мови програмування Python для різних сценаріїв програмного налаштування процесу моделювання та імпорту отриманих результатів.

Метою даної роботи є створення автоматизованої системи керування новим обладнанням для деформування порожнистих заготовок крученням під тиском, що дозволить збільшити міцність виробів та зменшити ймовірність помилок в процесі деформування на основі зменшення впливу людини на технологічний процес. Автоматизація також дасть можливість керувати багатьма параметрами процесу та корегувати роботу обладнання в реальному часі при нелінійній зміні цих параметрів по ходу деформування.

В цій роботі розглянуто проектування і реалізація АСК нової експериментальної установки, призначеної для проведення технологічного процесу деформування порожнистих заготовок крученням під високим тиском. Запропонований спосіб дозволяє із заготовок у вигляді шайби виробляти заготовки конічної форми зміцнюючи матеріал для більшої надійності майбутнього виробу, наприклад циліндричної втулки. На основі аналізу існуючих схем для КВТ

була розроблена схема технологічного процесу для порожнистих заготовок КВТ ПЗ, яка потребує дослідження поведінки металу в процесі пластичного деформування [15]. Схема деформування наведена на рисунку 1 у вигляді послідовних зображень стадій технологічного процесу отримання конічних заготовок.

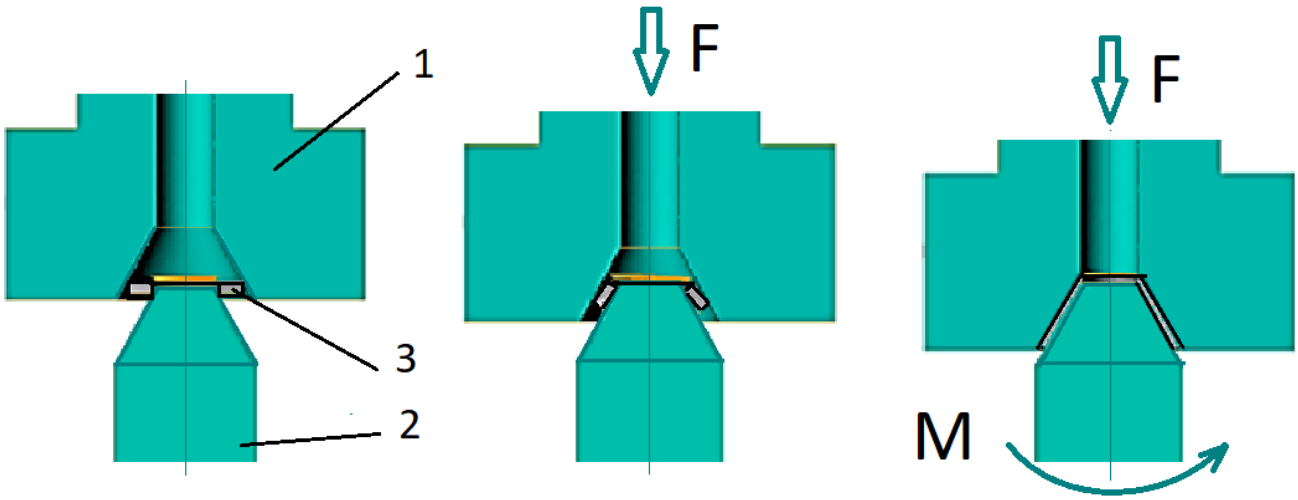


Рис. 1. Зображення трьох послідовних стадій технологічного процесу отримання конічних заготовок:

1 – матриця, 2 – пуансон, 3 – заготовка

Для цього технологічного процесу потрібна установка, яка буде створювати тиск одного інструмента - матриці на заготовку та механізм для обертів іншого інструмента - пуансона для створення зсувних деформацій на поверхні заготовки під час її деформації. При контролі технологічного процесу потрібно фіксувати силу тиску та частоту обертів редуктору, а також проводити налаштування пресової частини та швидкості обертів валу редуктору для коректного протікання процесу деформування. Зовнішній вигляд створеної установки наведений на рисунку 2.

Експериментальна установка включає зварну раму 1, на якій встановлений натискний гідроциліндр 2 зусиллям 100 кН, електродвигун 3 АИР 71-В2 потужністю 700 Вт, зубчаста муфта 4, нижній пуансон 5 та матриця 6. Крутний момент передається через черв'ячний редуктор 7 2Ч-80 з передаточним числом 40, контроль обертів проводить інкодер 8. Матриця 6 встановлена на верхній плиті 9. Черв'ячний редуктор встановлений на нижній плиті 10. Момент на валу редуктора передається на шліцьовий вал 11. Навантаження гідроциліндра 2 передається на підп'ятник 12 та упорний шарикопідшипник 13 серії 8117.

Також для вимірювання сили пресування було застосовано месдозу кільцевого типу, для контролю деформації заготовки – датчик лінійних переміщень BALLUFF BTL5-A11-MO200-P-S32, для вимірювання куту кручення заготовки – інкодер Siemens 6FX2001-2DB02. Всі вимірювальні пристрої були підключені до АЦП.

Датчики, які використовуються в установці в процесі моніторингу та проведенню цих процесів основними є параметри на рисунку 3.

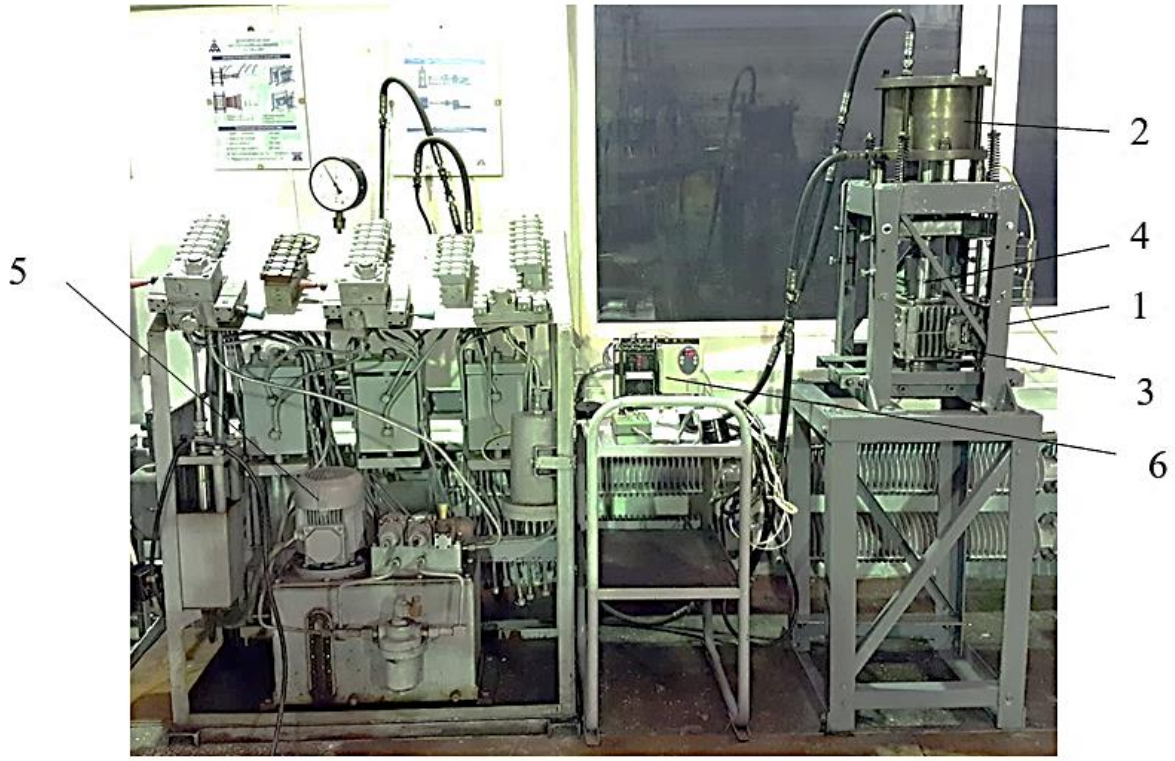


Рис. 2. Зовнішній вигляд установки:
1 – рама; 2 – гідроциліндр; 3 — редуктор; 4 – штамп; 5 – гідростанція; 6 – АСК

Першим етапом пропонованого в роботі процесу КВТ ПЗ є запуск гідравлічної станції яка буде керувати натискним гідроциліндром та моніторингу тиску на верхній інструмент-матрицю. Гідроциліндр буде опускатися до зіткнення з заготовкою. Коли станеться дотик верхнього інструменту до заготовки почнеться другий етап.

На другому етапі запускається обертаючий редуктор, продовжується переміщення гідроциліндру до досягнення необхідного значення переміщення інструменту для виконання деформування до необхідної товщини заготовки. Одночасно запускається моніторинг кількості обертів нижнього пуансону і температури заготовки. Коли буде досягнуто необхідне значення переміщення гідроциліндру почнеться третій етап.

Третій етап починається з зупинки матриці і відключенні обертаючого редуктору, завершується моніторинг тиску, кількості обертів і температури та виконується переміщення гідроциліндру до початкового положення.

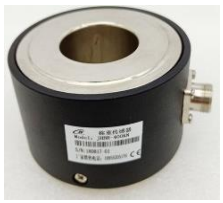
Алгоритм управління цим технологічним процесом може бути заданий графом переходів кінцевого автомата з подальшою декомпозицією (розподілом по процесорах).

Для експерименту по виготовленню заготовок конічної форми можливо виділити наступні діяльності і події, які наведені в таблиці 1, що представляє циклограму процесу:

- $Activities = \{ A_1, \dots, A_9 \}$;
- $(Events = \{a, b, d, e\})$,

де

a) Запуск роботи установки;
b) Дотик матриці до заготовки;
c) Виконано необхідне переміщення гідроциліндру;
d) Завершення роботи установки.



а

в

г

б

д

Рис. 3. Обладнання, яке використовується в системі управління установки:

а – месдоза кільцевого типу, б – датчик лінійних переміщень BALLUFF BTL5-A11-MO200-P-S32, в – інкрементальний енкодер Siemens 6FX2001-2DB02 з роздільною здатністю 1024 імп./об., г – частотний перетворювач Altivar 31 ATV31HU15N4, д – плата STM32F4DISCOVERY

Таблиця 1

Циклограма для процесу по виготовленню порожнистих заготовок конічної форми

	a	b	c	d
1 Керування переміщенням циліндру пресу вниз до дотику з матрицею	■			
2 Керування переміщенням циліндру пресу вниз в процесі деформування		■		
3 Запуск і оберти редуктору		■		
4 Переміщення циліндру пресу вверх			■	
5 Зупинка редуктору			■	
6 Моніторинг тиску	■	■		
7 Моніторинг кількості обертів		■		
8 Моніторинг температури		■		
9 Вимкнення приводу установки				■

Складність контролю технологічного процесу людиною та необхідність чіткого контролю товщини майбутньої заготовки підтверджує необхідність проектування АСК для запропонованого процесу КВТ ПЗ. Для опису складу установки з АСК розроблена діаграма визначення блоків SysML, яка представлена на рисунку 4.

На основі циклограми, представленої в таблиці 1, зробимо опис функціональних взаємодій елементів системи за допомогою логічної структурної схеми, наведеної на рисунку 5.

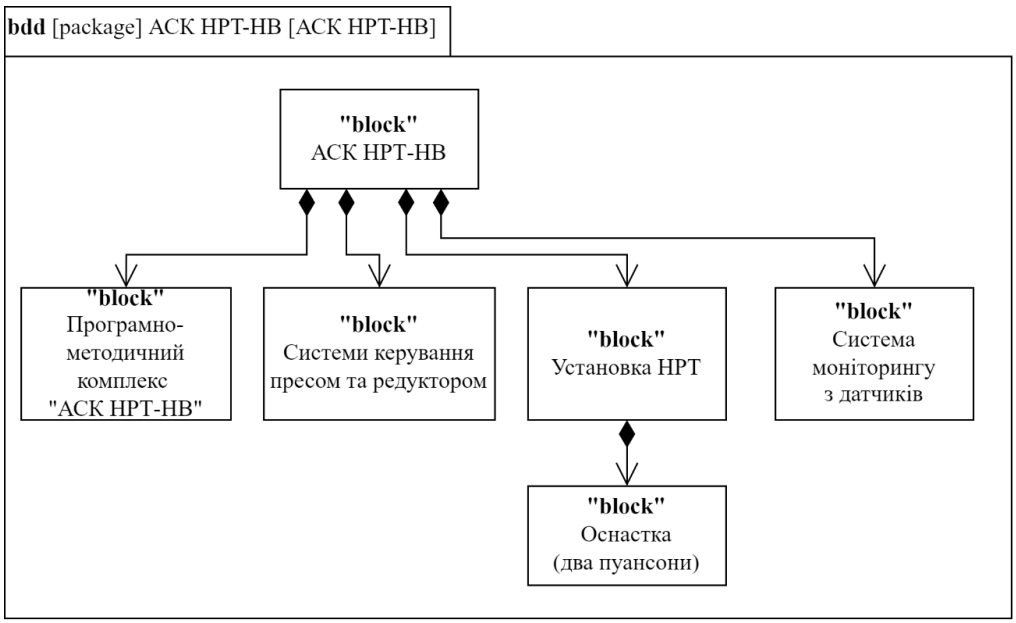


Рис. 4. Діаграма визначення блоків складу установки з АСК для реалізації технології КВТ ПЗ

Рис. 5. Логічна схема АСК установкою для процесу КВТ ПЗ

На діаграмі наведені параметри установки, які необхідно контролювати у часі. Наявні зв’язки дозволяють виконувати деформування з використанням різних сукупностей параметрів пресової і обертової частин установки. На основі аналізу сформульовані наступні основні вимоги до програмного комплексу АСК установкою для деформування конічних заготовок з крученням під тиском:

– ПК повинен мати модуль для керуванням всім обладнанням, яке застосовується в експериментах;

– ПК повинен мати модуль для фіксаціє даних з датчиків, які необхідні для проведення експерименту;

– ПК повинен мати модуль контролю проведення експерименту, який буде спостерігати за послідовністю технологічних операцій в експерименті та корегувати його налаштування;

– ПК повинен відображати поточний стан експерименту: опис операції, дані з датчиків та інструкції для приводів обладнання.

За цими вимогами до програмного комплексу спроектовано діаграму компонентів, яка представлена на рисунку 6.

Для включення та забезпечення необхідної кутової швидкості асинхронного двигуна, який використовується для приведення до руху пуансона експериментальної установки, використовується частотний перетворювач Altivar 31 ATV31HU15N4 потужністю 1,5 кВт [16].

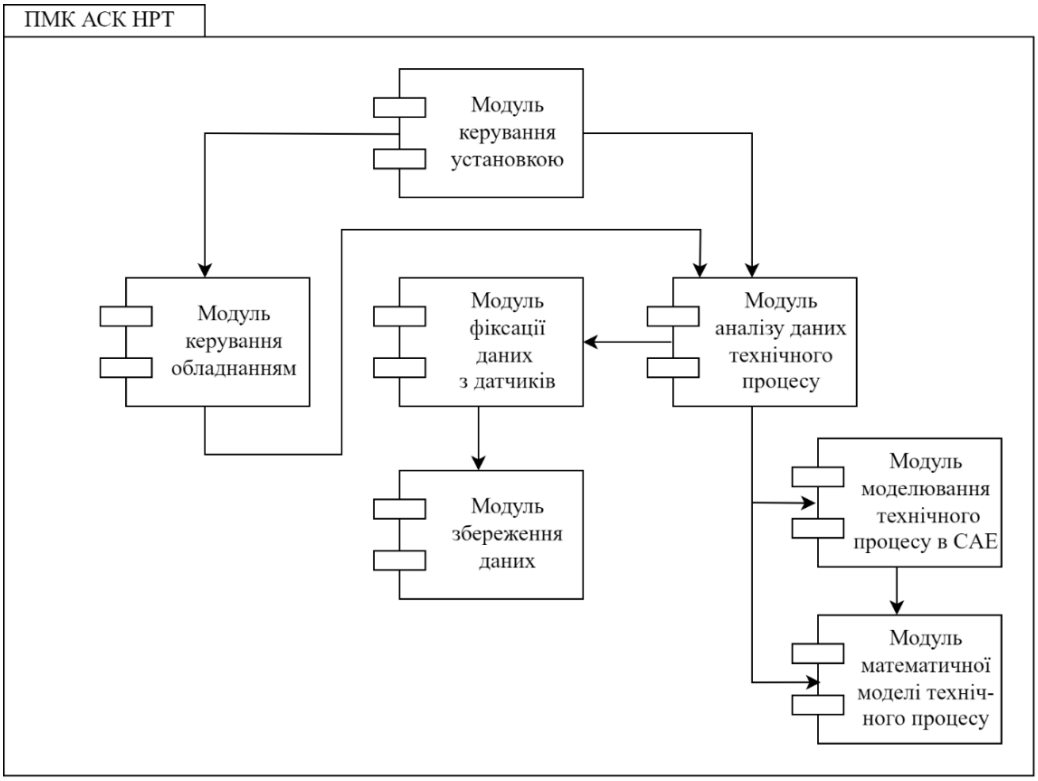


Рис. 6. Діаграма компонентів для програмного комплексу АСК

Програмування перетворювача частоти здійснювали шляхом зміни його параметрів: частота комутації, тривалість розгону, номінальна частота живлення двигуна, закон управління двигуном, призначення логічного входу і т. п. Кожен з таких параметрів має код і ряд значень. Для обробки імпульсів з датчика швидкості з подальшим підрахунком числа обертів механізму кручення використовувався принцип захоплення-порівняння, реалізований з використанням налагоджувального комплексу STM32F4Discovery. Для керування пуском та зупиненням електроприводу механізму кручення при досягненні необхідного числа обертів був використаний розроблений додаток з використанням мови програмування C#.

Розроблена система керування дозволила реалізувати керування установкою і отримання експериментальних заготовок необхідної якості.

ВИСНОВКИ

1. Аналіз існуючих схем та областей застосування технологічного процесу деформування методом кручення під високим тиском з описом перспектив та недоліків даного процесу у виробництві та аналіз розвитку методів проектування АСК показав необхідність створення такої системи.

2. Представлений новий процес отримання порожнистих заготовок за допомогою експериментальної установки при деформації крученням під високим тиском дозволить отримувати заготовки конічної або навіть циліндричної форми, які будуть мати субмікроскопічну структуру. Проблемою використання КВТ є моніторинг та керування значною кількістю параметрів, які можуть змінюватись нелінійно під час процесу деформації.

3. Спроектована SysML діаграма визначення блоків, яка описує складові установки з АСК для КВТ ПЗ**,** логічна схема АСК для опису взаємодії елементів цієї системи та UML діаграма компонентів, яка відображає основні модулі програмного комплексу для АСК.

4. Реалізована АСК КВТ ПЗ, яка дозволяє забезпечити необхідне керування приводами установки в процесі деформування заготовки. Отримані експериментальні заготовки необхідної якості.

5. Для точного підрахування числа обертів механізму кручення була використана налагоджувальна плата STM32F4Discovery. На її базі розроблено та реалізовано схемне та програмне рішення для здійснення вимірювання числа обертів. В залежності від числа потрібних обертів налагоджувальною платою здійснюється зміна стану її дискретного керуючого виходу. На цій основі здійснюється керування режимом роботи частотного перетворювача.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1 Segal V. Review: Modes and processes of severe plastic deformation (SPD). *Materials*. 2018. 11(7): 1175, С. 1–29. DOI: https://doi.org/10.3390/ma11071175

2 Li Y., Lu Z., Li T., Li D., Lu J., Liaw P. K., Zou, Y. Effects of surface severe plastic deformation on the mechanical behavior of 304 stainless steel. *Metals*. 2020. 10(6), С. 1–13. DOI: https://doi.org/doi:10.3390/met10060831

3 Edalati K., Horita Z. A Review on High-Pressure Torsion (HPT) from 1935 to 1988. Materials Science and Engineering A. 2016. 652. С. 325–352. DOI: https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.11.074

4 Silva C., Montoro L. A., Martins D. A. A. et al. Interface structures in Al-Nb2O5 nanocomposites processed by high-pressure torsion at room temperature. *Materials Characterization*, 2020. 162: 110222, С. 1–9. DOI: https://doi.org/10.1016/j.matchar.2020.110222

5 Kawasaki M., Langdon T. G. Review: achieving superplasticity in metals processed by high-pressure torsion. *Journal of Materials Science*. 2014. 49(19). С. 6487–6496. DOI: https://doi.org/10.1007/s10853-014-8204-5

6 Akbarpour M. R., Mirabad H. M., Alipour S., Kim H. S. Enhanced tensile properties and electrical conductivity of Cu-CNT nanocomposites processed via the combination of flake powder metallurgy and high pressure torsion methods. *Materials Science and Engineering*: A. 2019. 773: 138888, С. 1–10. DOI: https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.138888

7 Bartkowska A., Bazarnik P., Huang Y., Lewandowska M., Langdon T. G. Using high-pressure torsion to fabricate an Al–Ti hybrid system with exceptional mechanical properties. *Materials Science and Engineering*: A. 2021. 799: 140114. С. 1–5. DOI: https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.140114

8 Edalati P., Floriano R., Tang Y. et al. Ultrahigh hardness and biocompatibility of high-entropy alloy TiAlFeCoNi processed by high-pressure torsion. *Materials Science and Engineering*: C. 2020. 112: 110908. С. 1–10 DOI: https://doi.org/10.1016/j.msec.2020.110908

9 Квашнін В. О., Бабаш А. В., Квашнін В. В. Програмування та застосування мікроконтролерів STM32F4Discovery: монографія. Краматорськ: ЦТРІ “Друкарський дім”. 2017. 143 с. 978-6177415-30-4.

10 Henderson K., Salado A. Value and benefits of model-based systems engineering (MBSE): Evidence from the literature. *Systems Engineering*. 2021. 24(1). С. 51–66. DOI: https://doi.org/10.1002/sys.21566

11 Kumar A., Dhanwate S. SysML Based Modelling of Gear Shifting Strategy and Drivability for Automatic Transmission. *Journal of Physics Conference Series*. 2020. 1478: 012008. С. 1–9. DOI: https://doi.org/10.1088/1742-6596/1478/1/012008

12 Munk P., Nordmann A. Model-based safety assessment with SysML and component fault trees: application and lessons learned. Softw Syst Model. 2020. 19. С. 889–910. DOI: https://doi.org/10.1007/s10270-020-00782-w

13 Yoo S., Lee S., Kim S. et al. Integrating deep learning into CAD/CAE system: generative design and evaluation of 3D conceptual wheel. *Struct Multidisc Optim.* 2021. 64. С. 2725–2747. DOI: https://doi.org/10.1007/s00158-021-02953-9

14 Yuan W.-H., Wang H.-C., Zhang W., Dai B.-B., Liu K., Wang Y. Particle finite element method implementation for large deformation analysis using Abaqus. *Acta Geotechnica.* 2021. 16(8). С. 2449–2462. DOI: https://doi.org/10.1007/s11440-020-01124-2

15 Бабаш А. В., Квашнін В. О., Тарасов А. Ф., Грибков Е. П. Реалізація процесу інтенсивної пластичної деформації з використанням сучасного комплектного електропривода. *Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій* : матеріали IX Міжнародної науково-практичної конференції. 03–05 жовтня 2018 р. Запоріжжя : ЗНТУ. 2018. С. 168–170.

16 Казачковский Н. Н., Якупов Д. В. Программирование преобразователя частоты Altivar 31: Методические материалы для слушателей курсов повышения квалификации и студентов специальности 7.092203 «Электромеханические системы автоматизации и электропривод». Днепропетровск: учебный центр компании «Шнейдер Электрик». 2006. 45 с.

REFERENCES

1 Segal V. Review: Modes and processes of severe plastic deformation (SPD). Materials. 2018. 11(7): 1175, pp. 1–29. DOI: https://doi.org/10.3390/ma11071175

2 Li Y., Lu Z., Li T., Li D., Lu J., Liaw P. K., Zou, Y. Effects of surface severe plastic deformation on the mechanical behavior of 304 stainless steel. *Metals*. 2020. 10(6), pp. 1–13. DOI: https://doi.org/doi:10.3390/met10060831

3 Edalati K., Horita Z. A Review on High-Pressure Torsion (HPT) from 1935 to 1988. Materials Science and Engineering A. 2016. 652. pp.325-352. DOI: https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.11.074

4 Silva C., Montoro L. A., Martins D. A. A. et al. Interface structures in Al-Nb2O5 nanocomposites processed by high-pressure torsion at room temperature. *Materials Characterization*, 2020. 162: 110222, pp. 1–9. DOI: https://doi.org/10.1016/j.matchar.2020.110222

5 Kawasaki M., Langdon T. G. Review: achieving superplasticity in metals processed by high-pressure torsion. *Journal of Materials Science*. 2014. 49(19). pp. 6487–6496. DOI: https://doi.org/10.1007/s10853-014-8204-5

6 Akbarpour M. R., Mirabad H. M., Alipour S., Kim H. S. Enhanced tensile properties and electrical conductivity of Cu-CNT nanocomposites processed via the combination of flake powder metallurgy and high pressure torsion methods. *Materials Science and Engineering*: A. 2019. 773: 138888, pp. 1–10. DOI: https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.138888

7 Bartkowska A., Bazarnik P., Huang Y., Lewandowska M., Langdon T. G. Using high-pressure torsion to fabricate an Al–Ti hybrid system with exceptional mechanical properties. *Materials Science and Engineering*: A. 2021. 799: 140114. pp. 1–5. DOI: https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.140114

8 Edalati P., Floriano R., Tang Y. et al. Ultrahigh hardness and biocompatibility of high-entropy alloy TiAlFeCoNi processed by high-pressure torsion. *Materials Science and Engineering*: C. 2020. 112: 110908. pp. 1–10 DOI: https://doi.org/10.1016/j.msec.2020.110908

9 Kvashnin V.O., Babash A.V., Kvashnin V.V. Programming and application of STM32F4Discovery microcontrollers: monograph. Kramatorsk: CTRI "Printing House". 2017. 143 p. 978-6177415-30-4 (in Ukrainian).

10 Henderson K., Salado A. Value and benefits of model-based systems engineering (MBSE): Evidence from the literature. *Systems Engineering*. 2021. 24(1). pp. 51–66. DOI: https://doi.org/10.1002/sys.21566

11 Kumar A., Dhanwate S. SysML Based Modelling of Gear Shifting Strategy and Drivability for Automatic Transmission. *Journal of Physics Conference Series*. 2020. 1478: 012008. pp. 1–9. DOI: https://doi.org/10.1088/1742-6596/1478/1/012008

12 Munk P., Nordmann A. Model-based safety assessment with SysML and component fault trees: application and lessons learned. *Softw Syst Model*. 2020. 19. pp. 889–910. DOI: https://doi.org/10.1007/s10270-020-00782-w

13 Yoo S., Lee S., Kim S. et al. Integrating deep learning into CAD/CAE system: generative design and evaluation of 3D conceptual wheel. *Struct Multidisc Optim*. 2021. 64. pp. 2725–2747. DOI: https://doi.org/10.1007/s00158-021-02953-9

14 Yuan W.-H., Wang H.-C., Zhang W., Dai B.-B., Liu K., Wang Y. Particle finite element method implementation for large deformation analysis using Abaqus. *Acta Geotechnica*. 2021. 16(8). pp. 2449–2462. DOI:https://doi.org/10.1007/s11440-020-01124-2

15 Babash A.V., Kvashnin V.O., Tarasov A.F., Gribkov E.P. Implementation of the intensive plastic deformation process using a modern complete electric drive. *Modern problems and achievements in the field of radio engineering, telecommunications and information technologies* : materials of the IX International Scientific and Practical Conference. October 3–5, 2018. Zaporizhzhia: ZNTU. 2018. pp. 168-170 *(in Ukrainian).*

16 Kazachkovskii N.N., Yakupov D.V. Altivar 31 frequency converter programming: Methodical materials for advanced training courses and students of specialty 7.092203 "Electromechanical systems of automation and electric drive". Dnipropetrovsk: educational center of the company "Schneider Electric". 2006. 45 p. *(in Russian).*

Tarasov O. F., Kasyanyuk O. S., Gribkov E. P., Babash A. V., Kovalenko A. K. Design of the experimental plant control system for the process of torsion under high pressure of hollow blanks

The development of industrial enterprises and the introduction of Internet of Things technology in production require the creation of new mechanisms, the development of which requires the use of modern components followed by precise computer control of the process. In the field of pressure metal processing, high pressure torsion (HPT) machines can be considered such mechanisms, since this process is gaining popularity due to obtaining a submicroscopic structure in the workpiece and extremely high strength of the material as a result of processing. At the same time, the use of HPT installations has significant limitations, which are determined by a significant number of parameters that can change non-linearly during the deformation process. Installation management problems are solved thanks to the use of automated control systems (ACS) for technological process parameters. The article presents the essence of a new process of hollow blanks deformation using torsion under high pressure. A description of the experimental setup and the controls used is given. This technological process is represented by a set of events and activities, the connection between which is displayed in the form of a cyclogram. On the basis of the analysis of the presented technological process, a system of monitoring and ACS of the installation was developed. A logic diagram of the ACS, a diagram of determining the composition of the ACS installation for the implementation of the HPT technology and a components diagram of its software complex have been developed. A schematic solution for using a frequency converter to set the torsion mechanism in motion is presented. An incremental encoder from Siemens and an STM32F4Discovery debugging board were used to accurately count the rotations number of the torsion mechanism. The use of a frequency electric drive made it possible to increase the efficiency of the installation control. The development and use of similar ACS for other pressure metal processing installations will guarantee a stable technological process and the necessary physical properties of the workpieces.

Keywords: *high pressure torsion, hollow billet, plant, monitoring, automated control system*

Тарасов А. Ф., Касьянюк А. С., Грибков Э. П., Бабаш А. В., Коваленко А. К. Проектирование системы управления экспериментальной установкой для процесса кручения под высоким давлением полых заготовок

Развитие промышленных предприятий и внедрение технологии интернета в производстве требуют создания новых механизмов, для разработки которых необходимо использование современных компонентов с последующим точным компьютерным управлением процессом. В области обработки металлов давлением такими механизмами можно считать установки для кручения под высоким давлением (КВД, high pressure torsion, HPT), поскольку этот процесс получает распространение благодаря получению субмикроскопической структуры в заготовке и чрезвычайно высокой прочности материала в результате обработки. В то же время использование установок КВД имеет существенные ограничения, которые обусловливаются значительным количеством параметров, которые могут нелинейно изменяться во время процесса деформации. Проблемы управления установкой решаются благодаря использованию автоматизированной системы управления (АСУ) параметрами технологического процесса. В статье приведена сущность нового процесса деформации полых заготовок посредством кручения под высоким давлением. Представлено описание экспериментальной установки и использованных элементов управления. Этот технологический процесс представлен множеством событий и деятельности, связь между которыми отражена в виде циклограммы. На основе анализа представленного технологического процесса разработана система мониторинга и установка АСУ. Разработана логическая схема АСУ, диаграмма определения состава установки из АСУ для реализации технологии КВД и диаграмма компонентов ее программного комплекса. Представлено схемное решение использования частотного преобразователя для приведения в движение механизма вращения. Для точного подсчета числа оборотов механизма вращения использован инкрементальный энкодер фирмы Siemens и отладочная плата STM32F4Discovery. Использование частотного электропривода позволило повысить эффективность управления установкой. Разработка и использование подобных АСУ для других установок для обработки металлов давлением позволит обеспечить стабильный технологический процесс и необходимые физические свойства заготовок.

Ключевые слова: *кручение под высоким давлением, полая заготовка, установка, мониторинг, автоматизированная система управления*

Тарасов Олександр Федорович – д-р техн. наук, проф., зав. кафедрою ДДМА
Tarasov Oleksandr – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Head of Department DSEA
Тарасов Александр Федорович – д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой ДГМА
E-mail: kit@dgma.donetsk.ua
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0493-1529

Касьянюк Олександр Сергійович – асистент ДДМА
Kasyanyuk Oleksandr – Assistant DSEA
Касьянюк Александр Сергеевич – ассистент ДГМА
E-mail: kit@dgma.donetsk.ua
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8215-0920

Грибков Едуард Петрович – д-р техн. наук, проф. ДДМА
Gribkov Eduard – Doctor of Technical Sciences, Full Professor DSEA
Грибков Эдуард Петрович – д-р техн. наук, проф. ДГМА
E-mail: kit@dgma.donetsk.ua
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1565-6294

Бабаш Андрій Владиславович – асистент ДДМА
Babash Andriy – Assistant DSEA
Бабаш Андрей Владиславович – ассистент ДГМА
E-mail: kit@dgma.donetsk.ua
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7883-1459

Коваленко Андрій Костянтинович – асистент ДДМА
Kovalenko Andrii – Assistant DSEA
Коваленко Андрей Константинович – ассистент ДГМА
E-mail: kit@dgma.donetsk.ua
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3379-2000

ДДМА – Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ
DSEA – Donbas State Engineering Academy, Kramatorsk
ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск

Статья поступила в редакцию 30.05.22 г.

УДК 621.96.002.5 DOI: 10.37142/2076-2151/2022-1(51)188

Карнаух С. Г.
Чоста Н. В.

РОЗРОБКА ДОПОМІЖНИХ ПРИСТРОЇВ ДО ШТАМПІВ ДЛЯ ВІДРІЗКИ СОРТОВОГО ПРОКАТУ З СУВОМ З ДИФЕРЕНЦІЙНИМ ЗАТИСКОМ

Витрати заготівельного виробництва становлять значну частку в собівартості готової продукції. Тому завдання вдосконалення технології й устаткування для реалізації процесів розділення є актуальним. Перспективним способом поділу сортового прокату на мірні заготовки є безвідхідна відрізка зсувом. Однією із прогресивних схем поділу сортового прокату зсувом є схема відрізки з активним диференційним затиском. Економічність експлуатації штампа суттєво залежить від механізації допоміжних операцій, зокрема від пристрою упору й механізму подачі прокату. Метою роботи є розробка допоміжного устаткування й механізмів для подачі прутка в робочу зону штампа з диференційним затиском прокату. Аналіз конструктивних варіантів допоміжних пристроїв до штампів з диференційним затиском прокату проведено із застосуванням теорії графів. На підставі аналізу розробленого графу конструкцій передніх упорів до штампів з диференційним затиском прокату, у Донбаській державній машинобудівній академії розроблена оригінальна конструкція упору. Запропонована конструкція механізму упору дозволяє розширити технологічні можливості та підвищити якість відрізаних заготовок. Роботу упору синхронізовано з процесом відрізки заготовки, що дозволяє відрізати заготовки будь-якої довжини, у тому числі і короткі заготовки. Оскільки упор переміщується проти напряму подачі прутка (з боку рольгангу), виключається відскок прокату від упору, що забезпечує високу точність відрізаних заготовок за довжиною. Альтернативним рішенням застосування замість переднього упору є розроблена конструкція крокової подачі прокату до штампу з диференційним затиском прокату. Запропонована конструкція крокової подачі забезпечує більш точний вимір довжини, тому що виключає вплив кутової неточності подачі, неплощинності, неперпендикулярності торця, відскок прутка при ударі по упору. Тим самим підвищується геометрична точність і якість відрізаних заготовок, культура виробництва.

Ключові слова: *заготовка, прокат, упор, крокова подача, відрізка зсувом, штамп, диференційний затиск, якість, собівартість.*

Витрати заготівельного виробництва становлять значну частку в собівартості готової продукції. Тому завдання вдосконалення технології й устаткування для реалізації процесів розділення є актуальними [1].

У заготівельному виробництві використовується більш десяти різних способів виготовлення заготовок шляхом розділення сортового прокату на мірні заготовки. При цьому вибір способу одержання заготовки пов'язаний з конкретними техніко-економічними розрахунками собівартості готової деталі, зробленими для заданого обсягу річного випуску з обліком інших умов виробництва. Одним з перспективних способів поділу сортового прокату на мірні заготовки є безвідхідна відрізка зсувом [2–4].

Протягом багатьох років проведена велика робота з вивчення і вдосконалення способу відрізки зсувом, як у колишньому СРСР: «Мосстанкин», «ЭНИКМАШ», «МВТУ», «Кишеневский политехнический институт», Харківський авіаційний інститут, Донецький фізико-технічний інститут, так і за кордоном: Японія, Англія, Німеччина тощо, що знайшло своє відображення в роботах вчених: K. Kessler, F. Keller, Т. Накагави, Т. Екобори, Е. Орована, Г. В. Колосова, М. І. Мусхелішвілі, С. О. Христиановича, Г. І. Баренблатта, М. Я. Леонова, Г. П. Черепанова, В. В. Панасюка, О. І. Целікова, К. М. Богоявленського, В. Г. Кононенка, В. Т. Мещеріна, В. П. Романовського, В. М. Фінкеля, С. С. Соловцова, В. А. Тимощенка, Є. М. Третьякова та ін. [5].

Однією із прогресивних схем поділу сортового прокату є схема відрізки з активним поперечним затиском, і особливо її різновид, відомий за назвою «диференційний затиск». Принципова відмінність такої схеми відрізки полягає в тому, що в ній сила затиску прутка в ножах не постійна за значенням, а змінюється пропорційно силі відрізки. У момент утвору тріщин, що сколюють, сила F_p відрізки знижується до мінімуму й, отже, убуває пропорційна їй сила $F_з$ поперечного затиску. Заготовка має можливість відійти в осьовому напрямку від прутка, що запобігає утворенню дефектів на торцях [6].

Однак, незважаючи на наявність інформації про конструктивні реалізації схеми відрізки з диференційним затиском, подібне обладнання не знайшло широкого застосування на виробництві. Це пояснюється як недоліками конструктивних розробок, так і складнощами реалізації допоміжного устаткування для подачі прутків у робочу зону штампа.

Мета роботи – розробка допоміжного устаткування й механізмів для подачі прутка в робочу зону штампа з диференційним затиском прокату.

Економічність експлуатації штампа суттєво залежить від механізації допоміжних операцій, зокрема від пристрою упору й механізму подачі прокату [1]. Точність довжини заготовки також залежить від конструкції пристрою, що подає (крокової подачі, рольганга, упору) [5]. Надійне й швидке видалення відрізаних заготовок із штампа має важливе значення для забезпечення стабільної безвідмовної його роботи.

Для аналізу конструктивних варіантів упорів до штампів з диференційним затиском прокату розроблено граф (рис. 1).

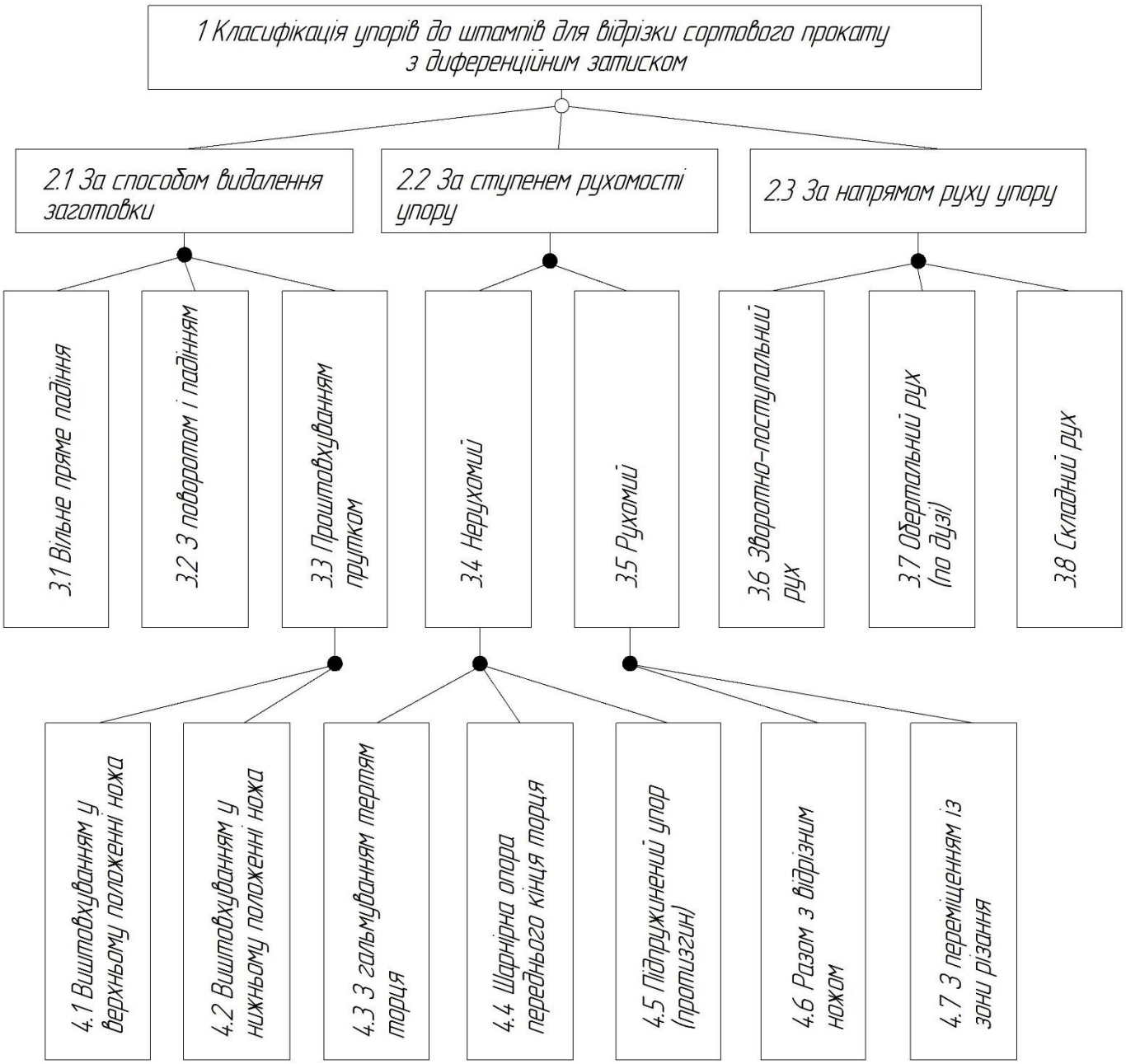


Рис. 1. Граф конструктивних варіантів упорів до штампів з диференційним затиском прокату

Для видалення заготовки з відрізних штампів використовують такі способи (2.1): вільне пряме падіння (3.1) під дією сили ваги; з поворотом і падінням (3.2); проштовхування прутком (3.3) під дією прикладеного активного зусилля [5].

Вільне пряме падіння (3.1, 3.2) в штампах з диференційним затиском прокату можливо реалізувати тільки для відрізки довгих заготовок довжиною не менше сумарної товщини стінки корпусу та відрізного ножа. Або в такій конструкції штампа, яка має відкритий рухомий відрізний ніж-піввтулку [1], що звужує технологічні можливості обладнання, в якому можливо реалізувати диференційний затиск тільки прутка (по один бік від площини різу).

Упор при реалізації варіантів (3.1, 3.2), як правило, виконують нерухомим (3.4) в таких конструктивних схемах: з гальмуванням тертям торця (4.3), з шарнірною опорою переднього кінця торця (4.4), з протизгином (4.5). Але всі вони доцільні для відрізки саме довгих заготовок, у яких $L \geq 2 \cdot d$.

Видалення заготовки може відбуватися, як у верхньому положенні відрізного ножа (4.1), так і у нижньому його положенні (4.2). Більш простим у конструктивній реалізації є варіант (4.1). Упори з видаленням заготовки проштовхуванням у нижньому положенні ножа (4.2) застосовують переважно у тих випадках, коли виштовхування уперед неможливе, а реалізовано саме назад.

За ступенем рухомості упор може бути виконаний рухомим (3.5). Штампи з рухомими упорами (3.5), які жорстко пов’язані з відрізним ножем і не відводяться для видалення заготовок, застосовуються рідко, так як придатні для відрізки тільки довгих заготовок.

За напрямом руху самого упору (2.3) при переміщенні із зони різання можливі такі варіанти: зворотно-поступальний рух (3.6), обертальний рух (3.7), складний рух (3.8).

Найбільш універсальним для штампів з диференційним затиском прокату є спосіб видалення заготовки проштовхуванням прутком (3.3) з переміщенням упору із зони різання (4.7), який і одержав найбільше поширення [6].

Однак застосування способу (3.3) обмежене внаслідок необхідності відводу переднього упору в момент виштовхування. Оскільки довжина заготовки, що відрізається в штампі з диференційним затиском прокату, повинна становити не менш двох діаметрів перерізу, то упор у момент відрізки (при відрізці недовгих $L \cong 2 \cdot d$ і коротких $L \leq 0{,}8 \cdot d$ заготовок) розміщується в робочій порожнині відрізного ножа. Для видалення відрізаної заготовки проштовхуванням (3.3) упор повинен залишити робочу зону штампа, а після видалення – повернутися у вихідне положення [7–11].

Для вирішення поставлених проблем, на кафедрі основ проектування машин Донбаської державної машинобудівної академії, розроблено механізм упору до штампа (рис. 2) [12]. Механізм упору до штампу для відрізки сортового прокату зсувом містить станину 1 і підпружинений упор 2, встановлений з можливістю обертального руху. При цьому в станині 1 розміщено рухому раму 3 з можливістю зворотно-поступального руху під дією підпружинених двох клинів 4. Клини 4 встановлено з можливістю контакту по клиновим поверхням з відповідними поверхнями рухомої рами 3, а підпружинений упор 2 розміщено у втулці 5, з можливістю регулювання його положення відносно втулки за допомогою гайок 6. При цьому втулка 5, з одного боку, зв'язана поперечиною 7 з гільзою 8, яку встановлено на осі 9, що закріплена на корпусі штампу, а з іншого – за допомогою пружини 10 зі станиною 1. Клини 4 зв'язані між собою поперечиною 11, яка контактує з пружиною 12, встановленою між поперечиною 11 і станиною 1.

Механізм упору до штампу для відрізки сортового прокату зсувом працює в такий спосіб. Під дією сили преса клини 4 рухаються вниз і переміщують рухому раму 3 разом з гільзою 8 і упором 2 горизонтально вперед до внутрішньої порожнини ножових вкладишів. При цьому пруток, долаючи силу подачі рольганга, також рухається вперед на задану величину, забезпечуючи відрізку заготовок заданої довжини. У цьому випадку виключається відскок прокату від упору, що забезпечує високу точність відрізаних заготовок. При подальшому русі повзуна преса вниз відбувається затиск і відрізка прокату. Оскільки передбачається, що упор у крайньому положенні розташовується в порожнині ножових вкладишів, то при відрізці прокату

відбувається поворот упору 2 щодо осі 9. При цьому пружина 10 працює на стискання й кручення. Пружина 12 працює на стискання.

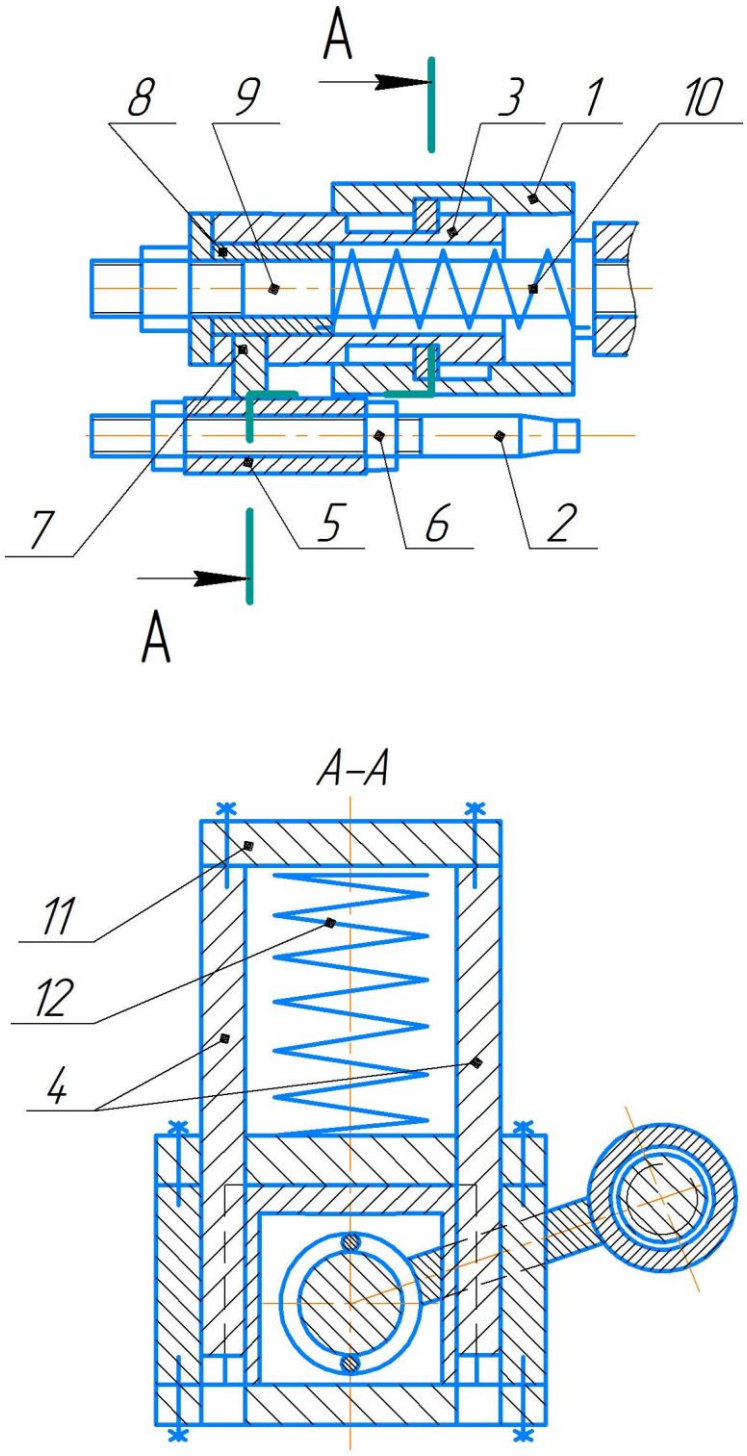


Рис. 2. Механізм упору до штампу для відрізки сортового прокату зсувом

Тому після відділення заготовки під дією сил пружин 10 і 12 механізм упору до штампу повертається у вихідне положення. Під дією сили з боку рольганга пруток проштовхує відрізану заготовку, і вона падає в тару. Пруток рухається вперед до контакту з упором 2. Цикл роботи поновлюється.

Запропонована конструкція механізму упору дозволяє розширити технологічні можливості та підвищити якість відрізаних заготовок. Роботу упору синхронізовано з процесом від-

різки заготовки, що дозволяє відрізати заготовки будь-якої довжини, у тому числі, короткі заготовки. Оскільки упор переміщується проти напряму подачі прутка з боку рольгангу, виключається відскік прокату від упору, що забезпечує високу точність відрізаних заготовок за довжиною.

Альтернативою переднього упору може стати механізм крокової подачі прокату. Крокова подача забезпечує більш точний вимір довжини, тому що виключає вплив кутової неточності подачі, неплощинності, неперпендикулярності торця, відходу прутка при ударі по упору. Тому для відрізки сортового прокату в штампах з диференційним затиском прокату розроблений механізм крокової подачі (рис. 3).

Механізм крокової подачі прокату (див. рис. 3) складається з рами 1, у напрямних якої встановлена каретка 2 з можливістю зворотно-поступального руху, і рольганга 3. Рама 1 разом з рольгангом 3 кріпиться до штампу. На каретці 2 установлений механізм затиску прокату 4 із приводом від пневмоциліндра. За рахунок того, що механізм затиску прокату 4 виконаний підпружиненим, він є самовстановлюючим і адаптується щодо положення прокату, який подається у зону відрізки. Каретка 2 механічно зв'язана зі штоком силового пневмоциліндра 5. Для забезпечення плавності роботи пневмоциліндра 5 у ньому виконані гальмові порожнини. Для забезпечення надійної фіксації прокату в момент повернення каретки 2 у вихідне положення, а також для погашення інерційних навантажень, що мають місце при русі прокату із прискоренням, у конструкції механізму крокової подачі прокату передбачене гальмо 6, яке кріпиться безпосередньо до штампа.

Сила затиску прокату, а також початкове й кінцеве прискорення при переміщенні прутка на заданий крок вибираються з урахуванням маси прутка так, щоб виключити проковзування у затиску.

Принципова комбінована схема крокової подачі прокату представлена на рис. 4. Циклограма роботи крокової подачі наведена в табл. 1.

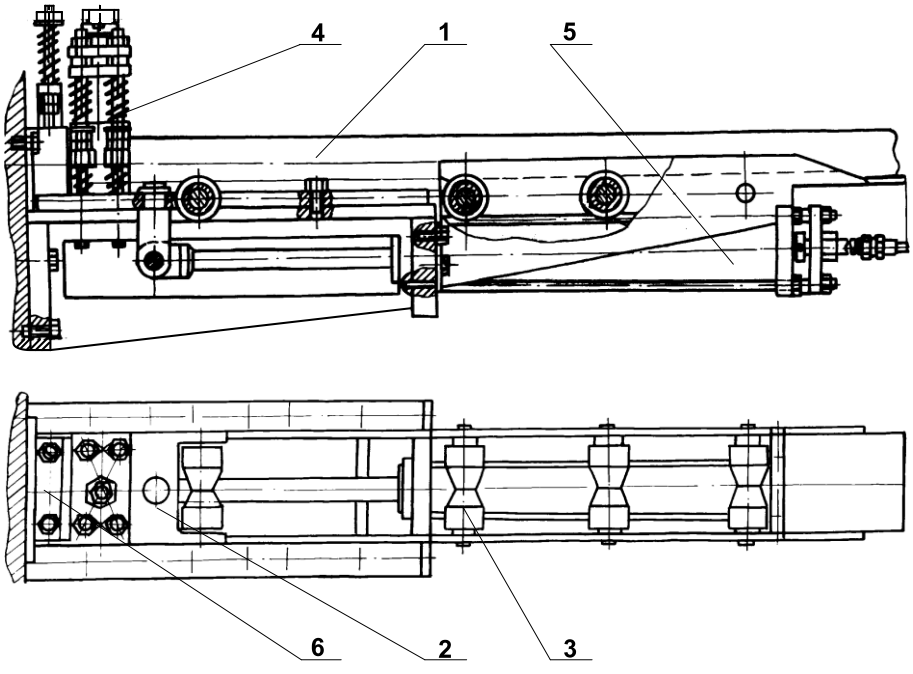


Рис. 3. Механізм крокової подачі сортового прокату

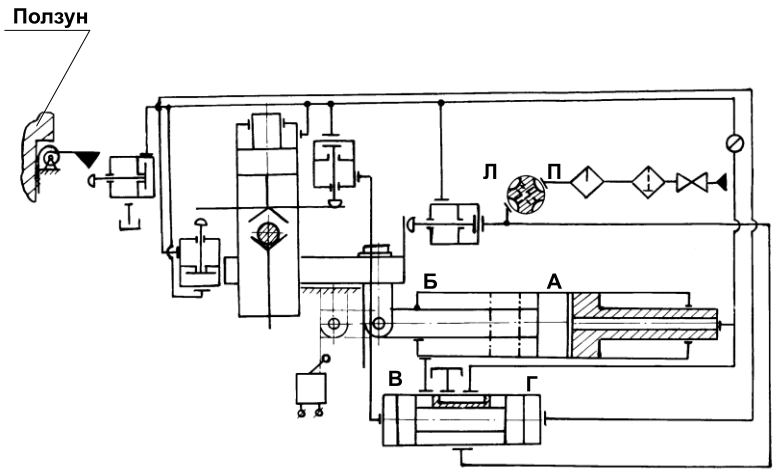


Рис. 4. Принципова комбінована схема крокової подачі прокату

Таблиця 1

Циклограма механізму крокової подачі прокату

Номер позиції / Цикл роботи	1		2		3		4	5	6	7	8
	А	Б	В	Г	Л	П					
Вихідне положення	+	-	-	+	-	+	+	+	-	-	-
Затиск прокату	+	-	-	+	-	+	+	-	-	+	-
Хід штока пневмоциліндру вперед	-	+	+	-	-	+	-	-	-	+	+
Робочий хід преса	-	+	+	-	-	+	-	-	-	+	+
Холостий хід преса	-	+	+	-	-	+	-	-	+	+	+
Розтиск	-	+	+	-	-	+	-	+	-	-	+
Хід штока пневмоциліндру назад	+	-	-	+	-	+	+	+	-	-С	-

ВИСНОВКИ

1. На підставі аналізу розробленого графу упорів до штампів з диференційним затиском прокату, розроблена оригінальна конструкція упору. Запропонована конструкція механізму упору дозволяє розширити технологічні можливості та підвищити якість відрізаних заготовок. Роботу упору синхронізовано з процесом відрізки заготовки, що дозволяє відрізати заготовки будь-якої довжини, у тому числі, короткі заготовки. Оскільки упор переміщується проти напряму подачі прутка з боку рольгангу, виключається відскок прокату від упору, що забезпечує високу точність відрізаних заготовок за довжиною.

2. Альтернативним рішенням переднього упору є розроблена конструкція крокової подачі прокату до штампу з диференційним затиском прокату. Запропонована конструкція крокової подачі забезпечує більш точний вимір довжини, тому що виключає вплив кутової неточності подачі, неплощинності, неперпендикулярності торця, відходу прутка при ударі по упору. Тим самим підвищується якість відрізаних заготовок, культура виробництва.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Соловцов С. С. Безотходная разрезка сортового проката в штампах. Москва: Машиностроение. 1985. 176 с.

2. Lisunets N. L. Usage of physical and mathematical simulation for improvement of the processes of metal shear cutting. *CIS Iron and Steel Review*. 2019. 17. pp. 34–38.

3. Lisunets N. L. Improving the efficiency of the processes of billets manufacture from rolled metal via shift cutting based on simulation. Chernye Metally. 2018. 6. pp. 31–35.

4. Lisunets N. L., Demetrashvili I.S., Goyi H.M. Development and characterization of the manufacturing process of cylindrical-shaped semi-finished products from non-ferrous alloys for stamping on the basis of modeling. *Tsvetnye Metally*. 2018. 5. pp. 82–85.

5. Карнаух С.Г. Совершенствование безотходных способов разделения сортового проката и оборудования для получения заготовок высокого качества : монография. Краматорск: ДГМА. 2010. 196 с.

6. Карнаух С.Г. Разработка штампов для отрезки проката с дифференцированным зажимом. *Кузнечно-штамповочное производство*. 2000. 4. С. 19–22.

7. Бегунов А.А., Карнаух С.Г. Силовые характеристики безотходных способов разделения проката. *Сборник трудов Седьмой конференции пользователей программного обеспечения CAD-FEM GmbH.* Москва : Полигон – пресс. 2007. С. 360–365.

8. Karnaukh S.G., Karnaukh D.S. Research of the influence of deformation speed on energy and power adjectives of the process of three-point cold bend breaking and on alignment integrity of raw parts. *Metallurgical and Mining Industry.* 3. 3. 2011. pp. 107–114.

9. Karnaukh S.G. Development of the choice procedure for separation method of section iron complex criteria of materials destruction. *Mechanics and Advanced Technologies*. 2017. 2(80). pp. 31–38.

10. Markov O., Kosilov M., Panov V., Kukhar V., Karnaukh S., Ragulina N., Rizak P. Modeling and improvement of saddling a stepped hollow workpiece with a profiled tool. *Eastern-European journal of Enterprise Technologies*. 6/1(102). 2019. pp. 19–25. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.183663.

11. Karnaukh Sergii G., Markov Oleg E., Aliieva Leila I., Kukhar Volodymyr V. Designing and researching of the equipment for cutting by breaking of rolled stock. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.* 109. 9-12. 2020. pp. 2457–2464. DOI: 10.1007/s00170-020-05824-7.

12. Пат. 124778 Україна. Механізм упору до штампу для відрізки сортового прокату зсувом. Карнаух С.Г., Карнаух Д.С., Літвиненко О.І.; заявл. 23.10.2017; опубл. 25.04.2018, Бюл. № 8, 2018.

REFERENCES

1. Solovtsov S. S. Waste-free cutting of high-quality rolled products in stamps. Moscow: Mechanical Engineering. 1985.176 p. *(in Russian)*

2. Lisunets N. L. Usage of physical and mathematical simulation for improvement of the processes of metal shear cutting. *CIS Iron and Steel Review*. 2019. 17. pp. 34-38.

3. Lisunets N. L. Improving the efficiency of the processes of billets manufacture from rolled metal via shift cutting based on simulation. *Chernye Metally*. 2018. 6. pp. 31-35.

4. Lisunets N. L., Demetrashvili I.S., Goyi H.M. Development and characterization of the manufacturing process of cylindrical-shaped semi-finished products from non-ferrous alloys for stamping on the basis of modeling. *Tsvetnye Metally*. 2018. 5. pp. 82-85.

5. Karnaukh S. G. Improvement of waste-free methods for separating long products and equipment for obtaining high-quality billets: monograph. Kramatorsk : DSEA. 2010. 196 p. *(in Russian)*

6. Karnaukh S.G. Development of dies for cutting off rolled products with differential clamping. *Forging and stamping production.* 2000. 4. pp. 19-22. *(in Russian)*

7. Begunov A. A., Karnaukh S. G. Power characteristics of waste-free methods of rolled metal separation. *Proceedings of the Seventh Conference of CAD FEM GmbH Software Users*. Moscow: Polygon – press. 2007. pp. 360-365. *(in Russian)*

8. Karnaukh S.G., Karnaukh D.S. Research of the influence of deformation speed on energy and power adjectives of the process of three-point cold bend breaking and on alignment integrity of raw parts. *Metallurgical and Mining Industry*. 3. 3. 2011. pp. 107-114.

9. Karnaukh S.G. Development of the choice procedure for separation method of section iron complex criteria of materials destruction. *Mechanics and Advanced Technologies*. 2(80). 2017. pp. 31-38.

10. Markov O., Kosilov M., Panov V., Kukhar V., Karnaukh S., Ragulina N., Rizak P. Modeling and improvement of saddling a stepped hollow workpiece with a profiled tool. E*astern-European journal of Enterprise Technologies.* 6/1(102). 2019. pp. 19-25. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.183663.

11. Karnaukh Sergii G., Markov Oleg E., Aliieva Leila I., Kukhar Volodymyr V. Designing and researching of the equipment for cutting by breaking of rolled stock. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 109. 9-12. 2020. pp. 2457-2464. DOI: 10.1007/s00170-020-05824-7.

12. Pat. 124778 Ukraine. Mechanism to stop up to the stamp for cutting of high-quality rolled products by means of a free-standing machine. Karnaukh S.G., Karnaukh D.S., Litvinenko O.I.; declared 10.23.2017; publ. 04.25.2018, Bul. No. 8, 2018. *(in Ukrainian)*

Карнаух С. Г., Чоста Н. В. Разработка вспомогательных устройств к штампам для отрезки сортового проката сдвигом с дифференцированным зажимом

Расходы заготовительного производства составляют значительную долю в себестоимости готовой продукции. Поэтому задача совершенствования технологии и оборудования для реализации процессов разделения является актуальной. Перспективным способом разделения сортового проката на мерные заготовки является безотходная отрезка сдвигом. Одной из прогрессивных схем разделения сортового проката сдвигом является схема отрезки с активным дифференцированным зажимом. Экономичность эксплуатации штампа существенно зависит от механизации вспомогательных операций, в частности от устройства упора и механизма подачи проката. Целью работы является разработка вспомогательного оборудования и механизмов для подачи прутка в рабочую зону штампа с дифференцированным зажимом проката. Анализ конструктивных вариантов вспомогательных устройств к штампам с дифференцированным зажимом проката проведен с применением теории графов. На основании анализа разработанного графа конструкций упоров к штампам с дифференциро-

ванным зажимом проката в Донбасской государственной машиностроительной академии разработана оригинальная конструкция упора. Предложенная конструкция механизма упора позволяет расширить технологические возможности и повысить качество отрезанных заготовок. Работа упора синхронизирована с процессом отрезки заготовки, что позволяет отрезать заготовки любой длины, в том числе и короткие. Поскольку упор перемещается против направления подачи прутка (со стороны рольганга), исключается отскок проката от упора, обеспечивается высокая точность отрезанных заготовок по длине. Альтернативным решением применению переднего упора является разработанная конструкция шаговой подачи проката в штамп с дифференцированным зажимом. Предложенная конструкция шаговой подачи обеспечивает более точное измерение длины, так как исключает влияние угловой неточности подачи, неплоскостности, неперпендикулярности торца, отскок прутка при ударе по упору. Тем самым повышается геометрическая точность и качество отрезанных заготовок, культура производства.

Ключевые слова: *заготовка, прокат, упор, шаговая подача, отрезка сдвигом, штамп, дифференцированный зажим, качество, себестоимость.*

Karnaukh S., Chosta N. Development of auxiliary devices for dies for cutting off section rolled products with displacement with a differentiated clamp

Procurement costs make up a significant share in the cost of finished products. Therefore, the task of improving technology and equipment for the implementation of separation processes is relevant. One of the promising ways of dividing long products into dimensional billets is waste-free cutting by shear. One of the progressive separation schemes for long products is the sectioning scheme with an active differential clamp. The profitability of the die operation essentially depends on the mechanization of auxiliary operations, in particular, on the stop device and the rolling feed mechanism. The purpose of the work is to develop auxiliary equipment and mechanisms for feeding the bar into the working area of the die with a differentiated clamping of rolled stock. The analysis of design options for auxiliary devices for dies with differential clamping of rolled products was carried out using the theory of graphs. Based on the analysis of the developed graph of designs of front stops for dies with differential clamping of rolled products, an original design of the stop has been developed in Donbass State Engineering Academy. The proposed design of the stop mechanism allows expanding technological capabilities and improving the quality of cut blanks. The work of the stop is synchronized with the process of cutting off the workpiece, which allows cutting workpieces of any length, including short ones. Since the stop moves against the direction of the bar feed (from the side of the roller table), the rebound of the rolled stock from the stop is excluded, and high precision of cut blanks along the length is ensured. An alternative solution to the use of a front stop is the developed design of a step-by-step feed of rolled products into a stamp with a differential clamp. The proposed design of the step feed provides a more accurate measurement of the length, since it excludes the influence of angular feed inaccuracy, non-flatness, non-perpendicularity of the end, rebound of the bar when hitting the stop. This increases the geometric accuracy and quality of cut blanks and production culture.

Key words: *billet, rolling, stop, step feed, shear cut, stamp, differential clamp, quality, prime cost.*

Карнаух Сергій Григорович – канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрою ДДМА
Карнаух Сергей Григорьевич – канд. техн.наук, доцент, зав. кафедрой ДГМА
Karnaukh Sergii – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of Department of the DSEA
E-mail: karnaukh.sergii@gmail.com.
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2878-4065

Чоста Наталія Вікторівна – канд. техн. наук, доцент ДДМА
Чоста Наталья Викторовна – канд. техн. наук, доцент ДГМА
Chosta Nataly – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
E-mail: natalychosta@i.ua.
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5275-6414

ДДМА – Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ
ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск
DSEA – Donbass State Engineering Academy, Kramatorsk, Ukraine

Стаття надійшла до редакції 14.06.22 р.

УДК 621.791 DOI: 10.37142/2076-2151/2022-1(51)196

Гринь О. Г.
Трембач І. О.

БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНИЙ АНАЛІЗ НАПЛАВОЧНИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ВІДНОВЛЕННЯ І ЗМІЦНЕННЯ ДЕТАЛЕЙ

Аналіз літературних даних показав, що для умов експлуатації деталей машин при дії ударного навантаження основною системою легування є Fe-C-Cr-Mn, яка забезпечує високу стійкість до удару за рахунок утворення аустенітної мікроструктури з дисперсними карбідами. Перспективним є додаткове введенням рідкісноземельних металів та їх оксидів. Зроблено аналіз сучасних матеріалів та систем легування для наплавлення інструменту, що зазнає тертя металу об метал при наявності удару. Визначено оптимальну системи легування, що забезпечить підвищення зносостійкості при відновленні та зміцненні деталей, які зазнають удару з тертям металевих робочих поверхонь. На основі аналізу літературних даних обґрунтовано вибір системи легування з метою підвищення зносостійкості при відновленні та зміцненні поверхонь деталей, які зазнають ударно-абразивного зносу. Визначення оптимальної системи легування для наплавлення деталей машин з високоманганової сталі, що працюють в умовах ударно-абразивного зносу, значно спрощує завдання з розробки економно легованих наплавочних матеріалів. На основі аналізу літературних даних показано, що для умов експлуатації втомного зношування, а також при коченні/ковзанні й ударах, термічного впливу рекомендуються сплави зі структурою мартенситу та мартенситу з карбідами. Показано, що для умов експлуатації при дії ударного навантаження основною системою легування є система Fe-C-Cr-Mn, що додатково легована Mo, V, Cu, B, а для наплавленої поверхні, що зазнає тертя металу об метал при наявності удару доцільно використовувати систему Fe-C-W-Mo-V. В обох випадках підвищення експлуатаційних властивостей металу можна досягти додатковим введенням рідкісноземельних металів та їх оксидів.

Ключові слова: *деталі машин, ударно-абразивний знос, система легування, наплавлення, рідкісноземельні метали, самозахисний порошковий дріт.*

Процес зношування деталей штампового оснащення та машин охоплює сукупність складних явищ, що відбуваються при взаємодії поверхневих шарів металу з середовищем, що зношує в певних конкретних, специфічних умовах експлуатації. Всі компоненти цього процесу, що включають і метал, і зношуюче середовище, і зовнішні умови, за яких відбувається зношування, взаємопов'язані і кожен з них окремо і у взаємодії з іншими факторами надає певний вплив на кінцевий результат - процес зношування і величину зношування [1].

Тому важливим питанням є пошук шляхів оптимізації параметрів зношування, тобто врахування найбільш впливових, врахування котрих при дослідженні зношування забезпечить спрощення задачі зниження зносу деталей а, отже, збільшення терміну їх служби.

На даний час у вітчизняній та зарубіжній науковій літературі [2–6] з точки зору зношування накопичено вже досить великий експериментальний матеріал, цікаві та оригінальні наукові розробки, які можуть бути корисними для фахівців, які займаються як практичними, так і теоретичними проблемами підвищення зносостійкості матеріалів.

У світовій і вітчизняній практиці накопичений значний досвід використання як зносостійких матеріалів економно легованих сплавів системи легування Fe-C-Mn-Cr, які додатково леговані такими легуючими елементами, як Ti, V, Nb, а також Mo, Cu, B.

Відомо [7–9], що використання рідкоземельних металів і їх оксидів в електродних матеріалах впливає на очищення границь зерен металу, підвищенню міжкристалічних зв’язків, сприяє збільшенню кількості карбідної фази та її подрібненню. Все це забезпечує підвищення зносостійкості наплавленого металу.

Однією з основних причин, що ускладнюють вибір з існуючих або розробку нового сплаву для роботи в абразивних середовищах є велика різноманітність конкретних умов експлуатації з широким спектром параметрів зношування (твердість, температура абразивного середовища, наявність корозійного фактора, твердість абразиву, характер навантаження, швидкість, тиск та інше), які значною мірою визначають зносостійкість матеріалу.

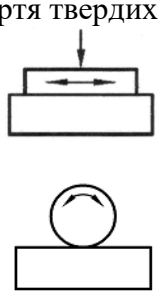
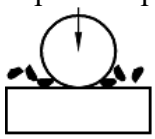
Метою даної роботи є аналіз та оптимізація параметрів зношування, які найбільш суттєво впливають на хімічний склад наплавленого металу, що забезпечує максимальну зносостійкість в конкретних умовах зношування.

Розглянемо сплави для наплавлення, що пропонуються стандартом ДСТУ EN 14700 «Матеріали зварювальні. Зварювальні матеріали для наплавлення» [10].

В таблиці 1 наведені приклади застосування сплавів для наплавлення залежно від виду контактної взаємодії та виду зношування [10].

Таблиця 1

Приклади застосування сплавів для наплавлення залежно від виду зношування

Вид контактної взаємодії	Вид зношування	Приклади наплавлених деталей	Сплави для наплавлення
Тверде тіло – тверде тіло Тертя твердих тіл 	Втомне зношування, зношування при ударах	Ковальський молот Коромисло клапана	Fe3, Fe9, Fe10
	Зношення при коченні й ударах	Ролики рольгангів	Fe3, Fe6, Fe7, Fe8
		Ковальські та пресові штампи	Fe3, Fe4, Fe6, Fe8
	Зношення при терті ковзання з ударами	Штампи, штампове оснащення	Fe3, Fe4
	Зношування при коченні Зношування при терті	Трамвайні рейки, стрілочні переводи	Fe9, Fe10
		Залізничні рейки	Fe9, Fe10
Тверде тіло – тверде тіло з прошарком абразиву 	Зношування при терті ковзання з ударами	Била молоткових дробарок	Fe6, Fe8, Fe9
		Лопати мішалок	Fe6, Fe8, Fe9
		Деталі дробарок	Fe6, Fe8, Fe9, Fe14
		Деталі млинів	Fe6, Fe8, Fe14, Fe15
		Молотки млинів	Fe8, Fe14, Fe15
Тверді частки, високий поверхневий тиск, удари	Зношування при терті ковзання з ударами	Лемехи плугів	Fe15
		Бункери	Fe14, Fe15
Тверде тіло – тверде тіло із абразивом, високий тиск	Зношування різанням з поверхневим тиском	Деталі ковшів	Fe15
		Деталі млинів	Fe14

З таблиці 1 видно, що для умов втомного зношування, зношення при коченні/ковзання й ударах (ковальські та пресові штампи, штампове оснащення, ролики рольгангів) найбільше поширення знаходять сплави Fe3 та Fe4, що містять велику кількість вольфраму та молібдену, а також сплави Fe7, Fe8, Fe9, які мають підвищений вміст хрому.

В умовах ударного навантаження використовують всі сплави Fe6, Fe8, Fe9, Fe14 та Fe15 (за винятком Fe10, який в своєму складі має мінімальний вміст вуглецю і максимальний нікелю, що сприяє утворенню аустенітної структури з високими пластичними властивостями, наявність же хрому сприяє утворенню карбідної фази, але її кількість не значна, що обумовлено низьким вмістом вуглецю (0,25%) в даному сплаві).

Деталі, що працюють в умовах зношення кочення (ковзання) та ударів (штампи, штампове оснащення, ковальські та персові штампи) застосовують сплави Fe3, Fe4 та Fe7 (система Cr-Ni-Mo-W), які мають мікроструктуру ферит / мартенсит + карбіди та максимальну твердість 450 НВ для сплавів Fe3 і Fe7 (не висока твердість пояснюється низьким вмістом вуглецю), та твердість 55-65 HRC для сплаву Fe4, що пов’язано з утворенням великої кількості карбідів вольфраму в мартенситній матриці.

При експлуатації деталей в умовах тертя з ударами (щокова дробарка, била молоткових дробарок, молотки млинів) найбільше поширення знаходять сплави Fe6 та Fe8 (система

Cr-Mn-Mo), які мають мікроструктуру мартенсит + карбіди та максимальну твердість 48-65 HRC, що пов'язано з розчинністю Mo, Cr, V в цементиті.

В таблиці 2 наведено хімічний склад сплавів для наплавлення [10].

Таблиця 2

Хімічний склад сплавів Fe3, Fe4, Fe6, Fe7, Fe8, Fe9, Fe10, Fe14 та Fe15 [10]

Сплави для наплавлення	Хімічний склад, % (мас. доля)						
	C	Cr	Ni	Mn	Mo	W	V
Fe3	0,2-0,5	1-8	≤ 5,0	≤ 3,0	≤ 4,5	≤ 10,0	≤ 1,5
Fe4	0,2-1,5	2-6	≤ 4,0	≤ 3,0	≤ 10,0	≤ 19,0	≤ 4,0
Fe6	≤ 2,5	≤ 10,0	-	≤ 3,0	≤ 3,0	-	-
Fe7	≤ 0,2	4-30	≤ 6,0	≤ 3,0	≤ 2,0	-	≤ 1,0
Fe8	0,2-2,0	5-20	-	≤ 3,0	≤ 5,0	-	≤ 2,0
Fe9	≤ 1,2	≤ 20,0	≤ 5,0	9-20	≤ 2,0	-	≤ 1,0
Fe10	≤ 0,25	17-22	7-11	3-8	≤ 1,5	-	-
Fe14	1,5-4,5	25-40	≤ 4,0	≤ 3,0	≤ 4,0	-	-
Fe15	3,0-7,0	20-40	≤ 4,0	≤ 3,0	≤ 2,0	-	-

В умовах зношення при коченні та терті (стрілочні переводи, залізничні рейки) найбільше поширення знаходять сплави Fe9 (система Cr-Mn) та Fe10 (система Cr-Mn-Ni), які мають аустенітну мікроструктуру та твердість 180-250 НВ.

У випадку зношення різанням (лемехи плугів, бункери) та при терті ковзання з ударами (молотки млинів, деталі ковшів) найбільше поширення знаходять сплави Fe14 та Fe15 (система Cr-Mn-Mo з високим вмістом вуглецю), які мають мікроструктуру мартенсит + аустеніт + карбіди та твердість 40-65 HRC.

Таким чином, для умов експлуатації при дії ударного навантаження основною є система легування Fe-C-Cr-Mn, що додатково легована Mo, Ni, V та Al, а в умовах тертя металу по металу з ударами додавання до цієї системи легування, в обмеженій кількості, Mo, W, V.

В таблиці 3 наведені властивості сплавів Fe3, Fe4, Fe6, Fe7, Fe8, Fe9, Fe10, Fe14 та Fe15 (їх структура та твердість), які мають відмінну стійкість в умовах ударного навантаження [10].

Таблиця 3

Властивості сплавів Fe3, Fe4, Fe6, Fe7, Fe8, Fe9, Fe10, Fe14 та Fe15, їх структура та твердість [10]

Символ сплаву	Опір тертю	Опір ударам	Корозійна стійкість	Тріщино-стійкість	Оброблю-ваність	Мікроструктура	Твердість	
							НВ	HRC
Fe3	3 і 4	2 і 3	4	1	1	Мартенсит (карбіди)	150-450	-
Fe4	2	2 і 3	3	2 і 3	3 і 4	Мартенсит + карбіди	-	55-65
Fe7	2	2	1 і 2	1	1 і 2	Феритна/ мартенситна	250-450	-
Fe6	1	1	4	2 і 3	3 і 4	Мартенсит + карбіди	-	48-55[а]
Fe8	1 і 2	1 і 2	3	2 і 3	3 і 4		-	50-65
Fe9	4	1	2 і 3	1 і 2	3	Аустенітна	200-250	40-50[б]
Fe10	4	1	2	1	2		180-200	38-42[б]
Fe14	1	3 і 4	2	4	4	Мартенсит + аустеніт + карбіди	-	40-60
Fe15	1	4	3	4	4		-	55-65

Критерії властивостей: 1 – відмінно, 2 – добре, 3 – прийнятно, 4 – не прийнятно, а – після штучного старіння за температури 480 °С 3-4 год., б – після зміцнення в процесі експлуатації.

Сплави Fe3 та Fe7 мають відмінну тріщиностійкість та оброблюваність (обумовлено відносно низькою твердістю), а сплав Fe4 є менш технологічним.

Найвищий опір ударам забезпечують сплави Fe6, Fe8 та Fe9. Краща тріщиностійкість, оброблюваність та здатність до зміцнення характерна для сплавів Fe9 та Fe10, що обумовлено фазовим складом металу.

В таблиці 4, за рекомендацією Міжнародного інституту зварювання, наведена класифікація наплавленого металу за мікроструктурою [11].

Таблиця 4

Класифікація наплавлення за мікроструктурою [11]

Група	Типовий склад	Мікроструктура	Характеристика	Призначення
Fe-M2 Инструментальна сталь	0,7 % C, 3,75 % Cr, 6 % Mo, 1,8 % W, 1,1 % V	Високо легований мартенсит з карбідами	Достатня ударостійкість, хороша стійкість до термічного удару та циклічного перегріву, твердість 45-60 HRC	Гарячі та холодні ножиці штампів
Fe-M3 Корозійностійка сталь	0,17 % C, 1,3 % Mn, 13,6 % Cr, 4,2 % Ni, 0,6 % Mo, 0,6 % Nb, 0,2 % V	Мартенситна	Хороша зносостійкість метал по металу, корозійна стійкість, твердість 45-60 HRC	Ролики МНЛЗ
Fe-MA Мартенситно-аустенітна сталь	Типовий приклад: 1,0 % C, 9 % Cr, 3,0 % Si	Мартенсит та аустеніт	Хороша ударостійкість, хороша зносостійкість метал-метал, твердість 45-60 HRC	Сільськогосподарські знаряддя
Fe-AM Аустенітна манганова сталь	0,5-1,2 % C, до 30 % легування (Mn, ≤ 8% Cr, Ni, Mo) 1% C, 14% Mn	Аустенітна (з малою кількістю міжзеренними карбідами)	Відмінна стійкість до ударів, відмінна стійкість до зносу метал-метал, твердість 300 HB	Дробарки, молотки млинів, стрілочні переводи
Fe-AMC Аустенітна хромо-манганова сталь	0,3-0,5 % C, 25-40 % легуючих елементів (Cr, Mn) Типовий приклад: 0,4% C, 15% Mn, 15% Cr	Аустенітна	Відмінна стійкість до ударів, відмінна стійкість до зносу метал-метал, твердість після наплавлення 300 HB, зміцнення до 550 HB	Дробарки, молотки млинів, стрілочні переводи
Fe-AK Аустенітна манганова сталь, з карбідами	1,0-2,0 % C, 15-25 % легуючих елементів (Mn, Ti) 2% C, 15% Mn, 3,5% Cr, 3,5% Ti	Аустенітна з дисперсними карбідами	Відмінна стійкість до ударів, відмінна стійкість до зносу метал-метал, твердість після наплавлення 30-40 HRC	Дробарки, молотки млинів
Fe-PAE Первинний аустеніт з евтектикою	2,0-3,0 % C, 15-35 % легуючих елементів (Cr, Mo) Типовий приклад: 2,5% C, 30% Cr	Первинний аустеніт з аустенитно-карбідною евтектикою, карбіди $M_{23}C_6$	Прийнятна стійкість до ударів, добра стійкість до абразивного зносу, твердість після наплавлення 40-50 HRC	Дробарки, молотки млинів
Fe-NE Евтектика	3,0-4,0 % C, 20-35 % легуючих елементів (Cr, Mo) Типовий приклад: 3,5% C, 25% Cr	Евтектична суміш аустеніту та карбідів	Прийнятна стійкість до ударів, добра стійкість до абразивного зносу, твердість після наплавлення 53-58 HRC	Зуби ковшів, лопатки землерійних машин

Аналіз таблиці 4 показує, що в умовах втомного зношування, зношення при коченні/ковзання й ударах, термічного впливу рекомендуються сплави зі структурою мартенситу та мартенситу з карбідами.

Відмінну стійкість до удару мають сплави з аустенітною мікроструктурою (манганова та хромоманганова сталь) з дисперсними карбідами. З метою забезпечення високого опору при зношуванні з ударами треба забезпечити в наплавленому металі аустенітну структуру з дисперсними карбідами, яка здатна до динамічного деформаційного мартенситного перетворення. Відомо [12], що зносостійкість забезпечується наплавленням матеріалами, що мають гетерогенну структуру, яка складається з м'якою матриці (аустенітна, аустенітно-мартенситна) та значної (до 50%) кількості карбідної складової (карбіди та карбідна евтектики).

Наплавочні матеріали (порошкові дроти самозахисні та з додатковим захистом в захисних газах), які представлені на ринку провідними виробниками (ESAB, Lincoln Electric, UTP) згідно з їх каталогами, наведені в таблиці 5.

Таблиця 5

Марки наплавочних порошкових дротів згідно з каталогами виробників

Символ сплаву	Марка наплавочного матеріалу згідно з каталогом виробника		
	ESAB	Lincoln Electric	UTP
Fe3	OK Tubrodur 35 O M	-	UTP A 73 G 3
Fe4	-	-	UTP 690*
Fe6	OK Tubrodur 58 O/G M	-	UTP AF ROBOTIC 606
Fe7	OK Tubrodur 13Cr G	-	UTP A 661
Fe8	-	Lincore 50	-
Fe9	OK Tubrodur 15CrMn O/G	Lincore M	-
Fe10	OK Tubrodur 200 O D	-	-
Fe14	OK Tubrodur 55 O A	-	-
Fe15	-	Lincore 60-O	-

Примітка:*- наведена марка покритого електроду для ручного дугового зварювання.

В таблиці 6 наведено хімічний склад матеріалів для наплавлення.

Для наплавлення деталей, що працюють в умовах втомного зношування, зношення при коченні/ковзання й ударах знаходять системи на основі Fe-C-W-Mo-V леговані Ni, Al.

Найбільш поширеною системою легування матеріалів для наплавлення деталей, що працюють в умовах ударно-абразивного зносу, є Fe-C-Mn-Cr легованої Ni, Mo, V, Al.

Для підвищення зносостійкості застосовують комплексно леговані сплави, армовані дисперсними карбідами високої твердості (NbC, VC, TiC), що мають в складі металевої матриці метастабільний аустеніт. При цьому відзначається позитивний вплив підвищеної твердості карбідів, а також близькості їх кристалічної будови та аустеніту, що забезпечує краще їх утримування металевою матрицею.

При зміцненні робочої поверхні деталей, що працюють в умовах втомного зношування, зношування при ударах, зношення при терті з ударами застосовують систему легування яка забезпечує структуру металу типу мартенсит + аустеніт + карбіди або мартенсит + карбіди (ковальський молот, ковальські та пресові штампи, штампове оснащення).

Таким чином, перспективним напрямком є розробка економно-легованого складу самозахисного порошкового дроту (СПД) для підвищення зносостійкості деталей, що зазнають ударно-абразивного впливу, на основі системи Fe-C-Mn-Cr з додатковим введенням активних матеріалів, в тому числі рідкоземельних металів та їх оксидів.

Таблиця 6

Хімічний склад матеріалів для наплавлення

Матеріал для наплавлення	Хімічний склад, % (мас. доля)							
	C	Si	Mn	Cr	Mo	Al	V	Fe
Символ сплаву Fe3 згідно EN 14700								
OK Tubrodur 35 O M	0,15	0,3	1,1	1,0	0,5	1,6	2,2 Ni	решта
UTP A 73 G 3	0,25	0,5	0,7	5,0	4,0	-	0,6 Ti	решта
Символ сплаву Fe4 згідно EN 14700								
UTP 690	0,9	0,8	0,5	4,5	8,0	2,0 W	1,2	решта
Символ сплаву Fe6 згідно EN 14700								
OK Tubrodur 58 O/G M	0,4	0,3	1,2	5,0	1,2	0,6	-	решта
UTP AF ROBOTIC 606	0,5	0,6	1,4	6,0	0,5	-	-	решта
Символ сплаву Fe7 згідно EN 14700								
OK Tubrodur 13Cr G	0,2	0,4	1,2	13,0	1,5	2,5 Ni	0,23	решта
UTP A 661	0,2	0,7	0,7	17,5	1,2	-	-	решта
Символ сплаву Fe8 згідно EN 14700								
Lincore 50	2,2	1,0	1,2	11,0	0,5	0,6	-	решта
Символ сплаву Fe9 згідно EN 14700								
OK Tubrodur 15CrMn O/G	0,3	0,6	13,5	15,5	1,20	1,8 Ni	0,6	решта
Lincore M	0,6	0,4	13,0	4,9	-	-	0,5 Ni	решта
Символ сплаву Fe10 згідно EN 14700								
OK Tubrodur 200 O D	≤0,15	≤1,0	5,5	19,0	-	-	9,0 Ni	решта
Символ сплаву Fe14 згідно EN 14700								
OK Tubrodur 55 O A	3,5	0,5	0,9	21,0	3,50	-	0,4	решта
Символ сплаву Fe15 згідно EN 14700								
Lincore 60-O	4,2	1,3	1,6	25,4	-	0,6	-	решта

ВИСНОВКИ

Згідно з EN 14700 для умов експлуатації при дії ударного навантаження основною системою легування є система Fe-C-Cr-Mn, що додатково легована Mo, Ni, V та Al. При наявності тертя металу по металу з ударами кращі результати забезпечить додавання до цієї системи легування, в обмеженій кількості, Mo, W, V.

Високу стійкість до удару мають сплави з аустенітною мікроструктурою (манганова та хромоманганова сталь) з дисперсними карбідами, на основі системи Fe-C-Mn-Cr, з додатковим введенням активних металів та їх оксидів, що є передумовою розроблення економно-легованого складу СПД для підвищення зносостійкості деталей.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Домаш Е. В., Мельников Д. В., Спиридонов Н. В. Изучение технологических параметров формирования антифрикционных плазменных покрытий на основе ni и cu на примере подшипников скольжения. *Инженерия поверхности и реновация изделий:* Материалы 12-й Международной научно-технической конференции, 04–08 июня 2012. Ялта – Киев: АТМ Украины. 2012. С. 90–91.

2. Del Río López B., García Diez A., Mier Buenhombre J.L., Camba Fabal C., Filgueira Vizoso A. Microstructural analysis and tribology behavior of a medium-Mn steel with Mo. *Metals.* 2018. 8, pp.745.

3. Малинов В. Л. Износостойкость наплавленного металла с метастабильным аустенитом при абразивном и ударно-абразивном воздействии. *Вісник Приазовського державного технічного університету: зб. наукових праць*. ПДТУ. Маріуполь. 2012. Вип. 25. С. 146–157.

4. Плюта В. Л., Нестеренко А. М., Бобырь С. В. Экономнолегированные износостойкие сплавы: проблемы и перспективы. *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: Сб. научн. тр.* Дніпропетровськ: ІЧМ НАН України. 2008. Вип. 17. С. 231–239.

5. Антонюк Д. А., Редька М. О. Зносостійкість матеріалів в умовах зношування напівзакріпленим абразивом з локальними ударними навантаженнями та защемленням часток. *Проблеми трибології.* 2012. 3. С. 87–93.

6. Малинов В. Л. Экономнолегированные электродные материалы, обеспечивающие в наплавленном металле деформационное упрочнение при эксплуатации. *Автоматическая сварка*. 2006. 8 (640). С. 29–32.

7. Ефименко Н. Г., Балан Л. Н. и др. Влияние иттрия на структуру металла шва при сварке плавлением. *Сварочное производство*. 1985. 4. С. 6–8.

8. Карпенко В. М., Гринь А. Г. Сталь для наплавки рабочих частей разделительных штампов. *Кузнечно-штамповое производство*. 1989. 4. С. 26–27.

9. Гринь А. Г. Условие восстановления редкоземельных металлов из оксидов при наплавке порошковой проволокой [Электронный ресурс]. *Научный вестник ДГМА*. Краматорск. 2015. 3 (18Е). С. 86–91.

10. ДСТУ EN 14700:2019. Матеріали зварювальні. Зварювальні матеріали для наплавлення.

11. ISO/TR 13393. Welding consumables – Hardfacing classification – Microstructures.

12. Панфилов А. Н., Копошко А. В., Кусков Ю. М. Перспективы использования биметаллических износостойких листов SWIP в угольной промышленности. *Физико-технические проблемы горного производства:* сб. научн. тр. 2011. 14. С. 181–187.

REFERENCES

1. Domash E.V., Melnikov D.V., Spiridonov N.V. Study of technological parameters of formation of antifriction plasma coatings based on ni and su using the example of sliding bearings. Surface engineering and product renovation: *Materials of the 12th International Scientific and Technical Conference, June 04–08, 2012*. Yalta – Kyiv: ATM of Ukraine. 2012, pp. 90–91. *(in Russian).*

2. Del Río López B., García Diez A., Mier Buenhombre J.L., Camba Fabal C., Filgueira Vizoso A. Microstructural analysis and tribological behavior of a medium-Mn steel with Mo. *Metals.* 2018. 8, pp. 745.

3. Malinov V.L. Wear resistance of deposited metal with metastable austenite under abrasive and shock-abrasive impact. *Bulletin of the Pryazovsky State Technical University*: coll. scientific works. PDTU Mariupol. 2012. 25, pp. 146–157. *(in Russian).*

4. Plyuta V.L., Nesterenko A.M., Bobyr S.V. Economically alloyed wear-resistant alloys: problems and prospects Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy: *Sat. scientific tr. Dnipropetrovsk:* IChM NAS of Ukraine. 2008. 17, pp. 231–239. *(in Russian).*

5. Antonyuk D.A., Redka M.O. Wear resistance of materials in the conditions of wear by semi-fixed abrasive with local shock loads and pinching of particles. *Problems of tribology*. 2012. 3, pp. 87–93. *(in Ukrainian).*

6. Malinov V.L. Sparingly alloyed electrode materials that provide strain hardening in the deposited metal during operation. *Automatic welding*. 2006. 8, pp. 29–32. *(in Russian).*

7. Efimenko N.G., Balan L.N. et al. Influence of yttrium on the structure of the weld metal in fusion welding. *Welding production*. 4, 1985, pp. 6–8. *(in Russian).*

8. Karpenko V.M., Grin A.G., Steel for surfacing of working parts of dividing dies. *Forging and stamping production*. 1989. 4, pp. 26–27. *(in Russian).*

9. Grin' A. Conditions for the reduction of rare earth metals from oxides during surfacing with flux-cored wire. *Scientific Bulletin of the Donbass State Engineering Academy*. Kramatorsk. 2015. 3 (18E), pp. 86–91.

10. DSTU EN 14700:2019. Welding materials. Welding materials for surfacing.

11. ISO/TR 13393. Welding consumables - Hardfacing classification - Microstructures.

12. Panfilov A.N., Koposhko A.V., Kuskov Yu.M. Prospects for the use of SWIP bimetallic wear-resistant sheets in the coal industry. *Physical and technical problems of mining*. 2011. 14, pp. 181–187. *(in Russian).*

Grin O., Trembach I. Criteria for the selection of hard-facing materials for the restoration of parts

The analysis of literature data showed that for the operating conditions of machine parts under shock loading, the main alloying system is Fe-C-Cr-Mn, which provides high shocl resistance due to the formation of an austenite microstructure with dispersed carbides. The additional introduction of rare earth metals and their oxides is promising. An analysis of modern materials and alloying systems for surfacing a tool subjected to metal-to-metal friction in the presence of an impact was made. The optimal alloying system has been determined, which will ensure increased wear resistance during the restoration and strengthening of parts that are subjected to shock with the friction of metal working surfaces. Based on the analysis of literature data, the choice of the alloying system is substantiated in order to increase the wear resistance during restoration and strengthening of the surfaces of parts that are subject to shock-abrasive wear. Determining the optimal alloying system for surfacing machine parts made of high-manganese steel operating under conditions of shock-abrasive wear significantly simplifies the task of developing economically alloyed surfacing materials. Based on the analysis of literature data, it is shown that alloys with a structure of martensite and martensite with carbides are recommended for conditions of fatigue wear, as well as during rolling/sliding and impact, thermal impact. It is shown that for the conditions of operation under shock loading, the main alloying system is the Fe-C-Cr-Mn system, which is additionally alloyed with Mo, V, Cu, B, and for the deposited surface, which undergoes metal-to-metal

friction at in the presence of a shock it is advisable to use the Fe-C-W-Mo-V system. In both cases, an increase in the operational properties of the metal can be achieved by the additional introduction of rare earth metals and their oxides.

Key words: *machine parts, shock-abrasive wear, alloying system, surfacing, rare-earth metals, self-shielded flux-cored wire.*

Гринь А. Г., Трембач И. А. Критерии выбора наплавочных материалов для восстановления деталей

Анализ литературных данных показал, что для условий эксплуатации деталей машин при действии ударной нагрузки основной системой легирования является Fe-C-Cr-Mn, которая обеспечивает высокую устойчивость к удару за счет образования аустенитной микроструктуры с дисперсными карбидами. Перспективным является дополнительное введение редкоземельных металлов и их оксидов. Проведен анализ современных материалов и систем легирования для наплавки инструмента, подвергающегося трению металла о металл при наличии удара. Определена оптимальная система легирования, обеспечивающая повышение износостойкости при восстановлении и упрочнении деталей, подвергающихся удару с трением металлических рабочих поверхностей. На основе анализа литературных данных обоснован выбор системы легирования с целью повышения износостойкости при восстановлении и упрочнении поверхностей деталей, подвергающихся ударно-абразивному износу. Определение оптимальной системы легирования для наплавки деталей машин из высокомарганцевой стали, работающих в условиях ударно-абразивного износа, значительно упрощает задачи по разработке экономно легированных наплавочных материалов. На основе анализа литературных данных показано, что для условий эксплуатации усталостного износа, а также при качении/скольжении и ушибах, термическом воздействии рекомендуются сплавы со структурой мартенсита и мартенсита с карбидами. Показано, что для условий эксплуатации при действии ударной нагрузки основной системой легирования является система Fe-C-Cr-Mn, дополнительно легированная Mo, V, Cu, B, а для наплавленной поверхности, подвергающейся трению металла о металл при наличии удара целесообразно использовать систему Fe-C-W-Mo-V. В обоих случаях повышение эксплуатационных свойств металла можно достичь дополнительным введением редкоземельных металлов и их оксидов.

Ключевые слова: *детали машин, ударно-абразивный износ, система легирования, наплавка, редкоземельные металлы, самозащитная порошковая проволока.*

Гринь Олександр Григорович – канд. техн. наук, доц., декан ДДМА
Grin Oleksandr – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Dean DSEA
Гринь Александр Григорьевич – канд. техн. наук, доц., декан ДГМА
E-mail: mf@dgma.donetsk.ua
ORCID: https://orcid.org/%200000-0002-3432-8149

Трембач Ілля Олександрович – аспірант ДДМА
Trembach Illia – Graduate student DSEA
Трембач Илья Александрович – аспирант ДГМА
E-mail: i_trembach@ukr.net
ORCID: https://orcid.org/%200000-0002-3932-2520

ДДМА – Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ
DSEA – Donbass State Engineering Academy, Kramatorsk
ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск

Стаття надійшла до редакції 21.05.22 р.

УДК 621.98: 629.73.002.2 DOI: 10.37142/2076-2151/2022-1(51)204

Сухов В. В.
Кабанячий В. В.

ОЦІНКА РЕСУРСУ ДЕТАЛЕЙ НА СТАДІЇ ПРОЕКТУВАННЯ ТА АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ЗАГОТІВЕЛЬНО-ШТАМПУВАЛЬНОГО ВИРОБНИЦТВА

В роботі розроблено критерій оцінки ефективності технологічного процесу заготівельно-штампувального виробництва, що враховує ресурс деталі в експлуатації. Критерій розроблювався на засадах метода оцінки допустимої напруженості деталей авіаконструкцій, що виникає при її виробництві чи ремонті. Під напруженістю в точці розумілась відносна величина напруженого стану, що діє в ній, віднесена до меж статичної міцності в загальному випадку ортотропного матеріалу, і описана критерієм Хілла. Відповідно до сучасних уявлень про витривалість конструкційних матеріалів приймалось, що тріщини розташовуються поперек розтягувальної головної напруги (найбільшої), тобто відповідальними за виникнення та розвиток тріщин є переважно розтягувальні головні напруги. Отримано гранично допустимі значення напруженості для слабо, середньо та сильно напружених деталей конструкції, що піддаються багатоцикловому навантаженню в процесі експлуатації літака. Ці значення напруженості можуть використовуватися як критерії прийнятності технологічного процесу заготівельно-штампувального виробництва або слугувати засадою його доопрацювання, що забезпечує зниження до допустимого рівня залишкових технологічних напружень. Запропонований критерій ефективності технологічного процесу заготівельно-штампувального виробництва, що враховує ресурс деталі в експлуатації, дозволяє вибрати оптимальний технологічний процес, а також провести комплексний аналіз раціональності технологічного процесу за прийнятими критеріями технологічності та економічної ефективності. Запропонований критерій є досить загальним, оскільки ґрунтується на широко поширеній наразі лінійній гіпотезі підсумовування ушкоджень, він принципово не залежить від виду самої гіпотези і легко може бути адаптований до тієї, яка отримає найкраще експериментальне підтвердження для умов експлуатації літака та деталей, виготовлених із певного виду матеріалів.

***Ключові слова**: заготівельно-штампувальне виробництво, технологічний процес, критерій оцінки ефективності , ресурс деталі, напруженість деталі.*

Однією із високотехнологічних галузей промисловості є авіабудування. Розвиток цієї галузі в повному обсязі можливий лише в деяких державах. Це зумовлено необхідністю наявності високого наукового та технологічного потенціалу та можливістю держави фінансувати науково-дослідні та конструкторські роботи. Сучасний літак є складною вартісною конструкцією, яка повинна економічно експлуатуватися протягом тривалого часу. Забезпечення високого ресурсу літака є важливим завданням.

Для досягнення високої надійності та економічності особлива увага приділяється технології виробництва та технологічності конструкції. Забезпечення високих експлуатаційних параметрів літаків нерозривно пов'язане із застосуванням у конструкціях планера та двигунів нових конструктивно-технологічних рішень, з їхньою оптимізацією та ефективною реалізацією у виробництві. Технологічний чинник у багатьох питаннях є визначальним, реалізація якого залежить від оптимізації конструкції на всіх етапах проектування і виготовлення. Конструкція технологічна, якщо за оптимальних витрат забезпечені необхідні льотно-технічні характеристики літака (високі аеродинамічні характеристики, необхідний ресурс тощо).

Заготівельно-штампувальне виробництво (ЗШВ) об'єднує комплекс операцій обробки металів тиском та супутніх операцій, призначених для виготовлення заготовок та деталей літака. У загальному технологічному процесі виготовлення літака заготівельно-штампувальне виробництво займає одне з провідних місць. У заготівельно-штампувальних цехах виготовляються деталі фюзеляжу літака, окремі частини якого є штампозварні або штампо-клепані конструкції. Більшість деталей фюзеляжу літака виготовляється з листового матеріалу та пресованих профілів методами холодного штампування.

Заготівельно-штампувальне виробництво займає одне із провідних місць за обсягом реалізації в конструкціях літаків та за їхнього серійного виробництва. Від якості виготовлення деталей у заготівельно-штампувальних цехах залежить значною мірою якість та трудоміст-

кість складальних робіт, а також якість та надійність літака. Трудомісткість заготівельно-штампувальних робіт становить 14 – 18 % [1]. В авіабудуванні методами ЗШВ виготовляють 60–70 % деталей [1].

У літакобудуванні підвищення ефективності виробництва нерозривно пов'язані з удосконаленням його технологічної підготовки. При освоєнні випуску нових літаків на підготовку виробництва припадає 50-60% загального часу (тривалість циклу підготовки — 5 – 6 років). Зокрема, трудомісткість підготовки ЗШВ становить 12 – 16%. Скорочення тривалості виготовлення дослідних зразків та підготовки серійного виробництва нових літаків є найважливішим завданням.

В Україні [2] першою найбільшою публікацією, присвяченою питанням кількісної оцінки технологічності конструкції, стала робота В. В. Іванова [3]. Як основні показники технологічності конструкції автор пропонує трудомісткість та коефіцієнт використання матеріалу. Крім тих критеріїв, використовується велика кількість додаткових показників, для розрахунків яких потрібні додаткові трудовитрати.

У процесі реалізації комплексу науково-технічного забезпечення ЗШВ на стадії проектування типових елементів конструкції виникає низка важливих та складних проблем. Однією з таких проблем є забезпечення експлуатаційної надійності літака за високої технологічності його конструкції. Це дозволяє максимально зменшити обсяг доробок конструкції літака після завершення проектних робіт та в період його експлуатації.

У зв'язку з цим актуальною є проблема обґрунтування критерію врахування ресурсу на стадії проектування типових елементів авіаконструкцій для аналізу ефективності технологічних процесів ЗШВ [4]. Давно відомо про вплив технології виготовлення деталі на її статичну міцність та ресурс [5, 6]. Проведені дослідження з вивчення властивостей матеріалів, що використовуються у ЗШВ, та розробки методик оцінки окремих складових ЗШВ [1–18]. Однак методики кількісного врахування залишкових технологічних напружень відсутні.

Метою роботи є розробка критерію ефективності технологічного процесу ЗШВ, що враховує ресурс деталі в експлуатації

Розробку критерію ефективності технологічного процесу ЗШВ, що враховує ресурс деталі в експлуатації починаємо з методу [7] оцінки допустимої напруженості деталей авіаконструкцій, що виникає за її виробництві чи ремонті. Під напруженістю в точці розуміється відносна величина напруженого стану, що діє в ній, віднесеного до меж статичної міцності в загальному випадку ортотропного матеріалу, і описуваного критерієм Хілла [8]:

$$\frac{\sigma_x^2}{\sigma_{вх}^2}-\frac{\sigma_x\sigma_y}{\sigma_{ву}^2}+\frac{\sigma_y^2}{\sigma_{ву}^2}+\frac{\tau_{вху}^2}{\sigma_{вху}^2}=\Psi\,, \qquad (1)$$

де $\sigma_{вх}$, $\sigma_{ву}$, $\tau_{вху}$ - межі статичної міцності матеріалу в напрямку осей х і у площині хОу, σ_x, σ_y, τ_{xy} - напруги, що діють в точці; $\Psi \le 1$ - напруженість у точці.

Якщо знехтувати волокнистою структурою матеріалу при штампуванні і вважати його ізотропним, то (1) призводить до виразу, що відповідає четвертій (енергетичній) теорії міцності [9, 10]:

$$\sqrt{\frac{\sigma_x^2-\sigma_x\sigma_y+\sigma_y^2+3\tau_{xy}^2}{\sigma_в^2}}=\Psi\,. \qquad (2)$$

Вважається, що у деякій характерній для деталі системі координат *x*, *y* фіксуються компоненти експлуатаційних напружень σ_{xe}, σ_{ye}, τ_{xye} і постійні компоненти напружень технологічного походження (спадковості) σ_{xm}, σ_{ym}, τ_{xym}, що не релаксуються в процесі всього періоду експлуатації літака. Компоненти σ_{xe}, σ_{ye}, τ_{xye} змінюються в залежності від зовнішніх впливів на літак, тобто від нормованих випадків навантаження відповідно до чинних в авіабудуванні

норм. Тоді в цій системі координат будуть діяти суми алгебри компонентів ($\sigma_{xe}+\sigma_{xm}$) і ($\sigma_{ye}+\sigma_{ym}$), ($\tau_{xye}+\tau_{xym}$), відомі для кожного конкретного випадку.

У цьому випадку замість формули (2) для експлуатаційного стану без залишкової технологічної напруги, яка характеризується напруженістю Ψ_e, запишемо:

$$\sqrt{\frac{\sigma_{xe}^2-\sigma_{xe}\sigma_{ye}+\sigma_{ye}^2+3\tau_{xye}^2}{\sigma_в^2}}=\Psi_e. \tag{3}$$

і для експлуатаційного стану з технологічною спадковістю, що характеризується напруженістю Ψ_{em},

$$\sqrt{\frac{(\sigma_{xe}+\sigma_{xm})^2-(\sigma_{xe}+\sigma_{xm})(\sigma_{ye}+\sigma_{ym})+(\sigma_{ye}+\sigma_{ym})^2+3(\tau_{xye}+\tau_{xym})^2}{\sigma_в^2}}=\Psi_{em}. \tag{4}$$

Відповідно до сучасних уявлень про витривалість конструкційних матеріалів [10] встановлено, що тріщини розташовуються поперек розтягувальної головної напруги (найбільшої), тобто відповідальними за виникнення та розвиток тріщин є переважно розтягувальні головні напруги, проте при двовісному (пласкому) напруженому стані має місце зниження межі витривалості [9, 10].

Головні напруги, що розтягують і стискають, визначаються за відомою формулою [9, 10]

$$\sigma_{1,2em}=\frac{(\sigma_{xe}+\sigma_{xm})+(\sigma_{ye}+\sigma_{ym})}{2}+\frac{1}{2}\sqrt{[(\sigma_{xe}+\sigma_{xm})-(\sigma_{ye}+\sigma_{ym})]^2+4(\tau_{xye}+\tau_{xym})^2}. \tag{5}$$

При цьому кут повороту осі *x*, відповідний головній розтягувальній напрузі, визначається зі співвідношення

$$tg2\alpha=\frac{2(\tau_{xye}+\tau_{xym})}{[(\sigma_{xe}+\sigma_{xm})-(\sigma_{ye}+\sigma_{ym})]}. \tag{6}$$

Якщо система координат *x*', *y*', в яких діють залишкові технологічні напруги x_i, y_i, не збігається із системою координат експлуатаційного напруженого стану на кут φ щодо осі x, то компоненти напружень σ_{xm}, σ_{ym}, τ_{xym} у формулах (4) — (6) повинні визначатися за залежностями:

$$\begin{aligned}\sigma_{xm}&=\sigma_{x'm}\cos^2\varphi+\sigma_{y'm}\sin^2\varphi-\tau_{x'y'm}\sin 2\varphi;\\ \sigma_{ym}&=\sigma_{x'm}\sin^2\varphi+\sigma_{y'm}\cos^2\varphi-\tau_{x'y'm}\sin 2\varphi;\\ \tau_{xym}&=(\sigma_{x'm}-\sigma_{y'm})\sin\varphi\cos\varphi-\tau_{x'y'm}\cos 2\varphi.\end{aligned} \tag{7}$$

У роботі [11] залежно від типу конструкції, що визначається ступенем її відповідальності в літаку, визначено максимальні значення допустимої напруженості деталі, яка обумовлена технологією її виготовлення [Ψ_m]:

для слабо навантажених $[\Psi_m]_{\text{сл.н}} \le 0{,}33$ при $0 \le \Psi_{есл.н} \le 0{,}223$;

для середньо навантажених $[\Psi_m]_{\text{ср.н}} \le 0{,}223$ при $0 < \Psi_{еср.н} \le 0{,}33$;

для сильно навантажених $[\Psi_m]_{\text{с.н}} \le 0{,}06$ при $0{,}33 < \Psi_{ес.н} \le 0{,}75$.

У разі багатоциклового навантаження використовується методика роботи [11], проте вона вимагає врахування зниження межі статичної міцності. Так, межа витривалості Д16Т вчетверо

нижче статичної межі міцності у разі одновісного навантаження гладкого зразка при симетричному циклі, а реальної конструкції — в 20–40 разів [12]. Для забезпечення $\Psi_m \le 1$ при збереженні співвідношень діючих компонентів напруги, що визначаються зовнішніми навантаженнями на літак, з урахуванням залежності зниження статичної межі міцності при багатоцикловому навантаженні необхідно знизити допустиму напруженість деталі Ψ_{em}, а, отже, і $[\Psi_m]$.

Для слабо навантажених деталей виправдано зберегти значення $[\Psi_m]^y_{сл.н}$ та діапазон зміни $\Psi^y_{е.сл.н}$ такими, як і при статичному навантаженні.

Для середньо навантажених деталей, приймаючи, що середня межа міцності з урахуванням числа циклів відповідного ресурсу літака не перевищує $0{,}5\,\sigma_в$, отримуємо $[\Psi_m]^y_{ср.н} \le 0{,}111$; $0 \le \Psi^y_{е.ср.н} \le 0{,}165$.

Для сильно навантажених деталей, вважаючи, що середня межа міцності з урахуванням числа циклів, відповідного ресурсу літака, не перевищує $0{,}2\,\sigma_в$ [13], отримуємо $[\Psi_m]^y_{с.н} \le 0{,}01$; $0{,}066 \le \Psi^y_{е.с.н} \le 0{,}15$.

Отримані значення межової напруженості можуть бути вихідними якісними критеріями аналізу ефективності технологічних процесів ЗШВ з урахуванням забезпечення ресурсу. Однак для остаточного висновку про ефективність конкретного процесу необхідні точніші критерії.

Прогнозування витривалості (довговічності) деталі конструкції літака засноване на аналізі кривих Веллера [8], отриманих в результаті експериментальних випробувань зразків з конкретного матеріалу при певному вигляді циклічного навантаження. При цьому щоб уникнути подвійного врахування напруженого стану технологічного походження, зразки повинні виготовлятися з матеріалу в стані поставки.

На витривалість, як зазначалося, істотно впливають ступінь двовісності напруженого стану, і навіть частота навантаження, симетрія циклу, програма багатоциклового навантаження конструкції [11, 14, 15, 16].

Криві витривалості для *j*-го циклу можна описати рівняннями [17]

$$\sigma_j = \bar{\sigma}_N + a_1\left(\log N_j\right)^{-\alpha_1} при \ldots m = 0;$$
$$\sigma_j = \bar{\bar{\sigma}}_N + a_2\left(\log N_j\right)^{-\alpha_2} при \ldots m = 1, \qquad (8)$$

де σ_j – межа витривалості матеріалу з урахуванням N_j циклів; $m = \dfrac{\sigma_2}{\sigma_1}$ – ступінь двовісності напруженого стану $\left(|\sigma_1| > |\sigma_2|\right)$, $\bar{\sigma}_N$, $\bar{\bar{\sigma}}_N$, a_1, a_2, α_1, α_2 – параметри рівнянь, що визначаються експериментально.

Вважаючи, що залежність $\sigma_j = f(m)$ має вигляд

$$\sigma_j = \sigma_{m=0} - km, \qquad (9)$$

де k – коефіцієнт пропорційності,

$$k_{m=0} = \sigma_{m=0} - \sigma_{m=1}, \qquad (10)$$

з урахуванням (8) можна записати:

$$\sigma_j = \bar{\sigma}_N\left[1 - m(1-b)\right] + a_1\left(\log N_j\right)^{-\alpha_1}\left[1 - m(1-c)\right], \qquad (11)$$

де b, с – коефіцієнти; j – число циклів навантаження, що відповідає руйнівному напруженню.

З урахуванням експериментальних даних, отриманих у роботі [15] для сплавів Д16АТ, АМГ6-БМ, АК4-1Т1, отримаємо залежність

$$4{,}28\log\sigma_j = 10{,}55(1-0{,}3m) - \log N_j(1-0{,}5m). \quad (12)$$

Розв'язуючи (12) щодо ресурсу деталі в критичній точці отримуємо для деталі з технологічною спадковістю

$$N_{jee} = 10^{\left[10{,}55\left(\frac{1-0{,}3m_{em}}{1-0{,}5m_{em}}\right)-4{,}28\log\frac{\sigma_{1em}}{10}\right]}. \quad (13)$$

Аналогічну залежність можна записати для N_{je}, замінюючи у правій частині σ_{1em} на σ_{1e}.

Тоді коефіцієнт можливого зниження ресурсу при *j*-му типі циклічного навантаження внаслідок технологічної спадковості можна подати у вигляді:

$$k_{mj} = \frac{N_{jee}}{N_{je}}. \quad (14)$$

Якби в процесі експлуатації даної деталі мав місце лише один вид циклів (j = 1), то критерієм врахування ресурсу на стадії проектування типових елементів авіаційних конструкцій при аналізі ефективності технологічних процесів ЗШВ можна вважати вираз

$$\max\left\{k_{mj} = \frac{N_{jee}}{N_{je}}\right\}. \quad (15)$$

де i – індекс технологічного процесу.

Як приклад розглянемо нижню панель крила літака з алюмінієвого сплаву, для якого відомо [13], що зниження середнього експлуатаційного напруження від 100 до 90 МПа призводить до збільшення ресурсу в 1,8 рази. Початковий матеріал Д16Т має $\sigma_в$ = 450 МПа. У роботі [15] наведено дані про рівні діючих напружень у нижніх панелях центроплану крила: наприклад, для літака Ан-10 $\sigma_{x\max}$ = 375 МПа, для літака Іл-18 та Ту-104 $\sigma_{x\max}$ = 320...330МПа.

У табл. 1 наведені дані розрахунку довговічності за описаною вище методикою для ряду умовних технологічних процесів, що відрізняються рівнем напружень і характером напруженого стану.

Аналіз результатів табл. 1 показує:

1. Зниження експлуатаційних напружень від 100 до 90 МПа при несприятливій технологічній спадковості (при σ_{xm} = 55 МПа σ_{ym} = 15 МПа) збільшує ресурс деталі в 1,4 рази. Зниження експлуатаційних напружень цього ж значення за відсутності технологічної спадковості збільшує ресурс в 1,57 разу.

Ці дані дуже задовільно узгоджуються з результатами роботи [13].

2. Наявність $\sigma_{ym} \geq \sigma_{xm}$ завжди призводить до суттєвого збільшення ресурсу ($k_т > 1$), що свідчить про раціональність технологічних процесів.

3. Наявність дотичних напружень в експлуатаційному напруженому стані за інших однакових умов технологічної спадковості призводить до істотного зниження ресурсу.

4. Технологічна спадковість, що відповідає рівням напруженості $[\Psi_m]^y_{ср.н}$ і $[\Psi_m]^y_{с.н}$ практично не знижує ресурсу ($k_т$ = 1 … 1,1), що свідчить про обґрунтованість рекомендованих вище регламентів з технологічної напруженості.

Деталь у реальному літаку у різних випадках навантаження має різний експлуатаційний напружено-деформований стан, кожному з яких відповідає регламентована для конкретного ресурсу літака кількість циклів навантаження.

Таблиця 1

Розрахунок довговічності

Експлуатаційні напруження			Технологічні напруження		Головні напруження				m_e	$m_{ет}$	$N_e x10^6$	$N_{ет} x10^6$	$k_т$
σ_{xe}	σ_{ye}	τ_{xye}	σ_{xm}	σ_{ym}	σ_{1e}	σ_{2e}	σ_{1em}	σ_{2em}					
МПа													
200	0	0	10	54	200	0	210	54	0	0,26	0,10	0,33	3,3
			15	55	200	0	215	55	0	0,26	0,10	0,3	3,0
			10	10	200	0	210	10	0	0,05	0.10	0,1	1,0
			54	15	200	0	254	15	0	0,06	0,10	0,05	0,5
90	0	0	10	54	90	0	100	54	0	0,54	2,92	64,7	23,4
			15	55	90	0	105	55	0	0,52	2,92	47,5	16,2
			55	15	90	0	145	15	0	0,10	2,92	0,64	0,2
			19	10	90	0	100	10	0	0,10	2,92	3,1	1,1
100	0	0	10	54	100	0	110	54	0	0,47	1,86	28,1	15,0
			15	55	100	0	115	55	0	0,48	1,86	21,7	11,6
			55	15	100	0	135	15	0	0,97	1,86	0,5	0,25
			10	10	100	0	110	10	0	0,09	1,86	2,0	1,1
300	0	0	10	54	300	0	310	54	0	0,17	0,02	0,04	2,2
			54	10	300	0	354	10	0	0,03	0,02	0,01	0,6
			10	10	300	0	310	10	0	0,03	0,02	0,02	1,0
100	30	30	10	54	108	-8	123	41	-0,1	0,33	0,92	5.2	5,7
			54	10	108	-8	160	9	-0,1	0,06	0,92	0,3	0,4
			10	10	108	-8	118	2	-0,1	0,01	0,92	1,0	1,0

Аналіз впливів на літак дозволяє нормувати розрахункові блоки впливів з регламентованими рівнями напружень, що діють і при яких прогнозується сумарне число до руйнування конструкції.

Для аналізу ефективності матеріалу та впливу технології виготовлення (передісторії) деталі необхідні такі вихідні дані [13]: блок навантажень, що відображає типовий політ (рис. 1); напружений стан у критичних точках деталі в експлуатації з урахуванням технологічних залишкових напружень; якість конструкції у найбільш несприятливій зоні, що характеризується ефективним коефіцієнтом концентрації напружень $K_{еф}$; криві Веллера, побудовані за певного виду асиметрії циклів.

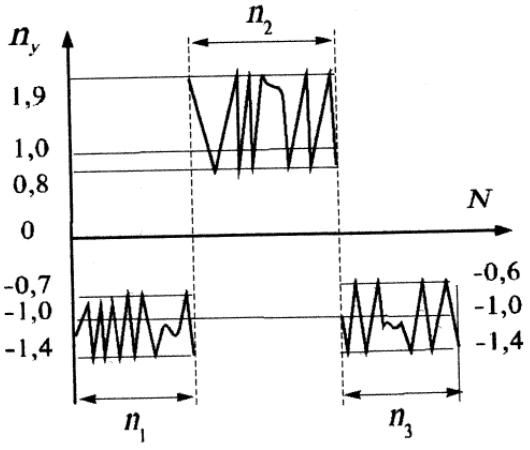


Рис. 1. Типовий програмний блок циклового навантаження літака у польоті

Всі ступені програмного блоку (рис. 1) приводяться до певної кількості еквівалетних пульсуючих циклів n_e. Приймається, що n_e створює таку ж ушкоджуваність конструкції в критичній точці, що й один програмний блок.

У блоці навантажень виділяється один повний (оригінальний) цикл від мінімального до максимального напруження з усіх наявних у заданому блоці (пунктирна лінія).

Приведення довільного циклу навантаження до еквівалентного пульсуючого залежно від ступеня асиметрії циклу навантаження $r = \dfrac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$ здійснюється за формулами

$$\text{для } -1 < r < 1 \quad \sigma_e = \sqrt{\sigma_{\max}(\sigma_{\max} - \sigma_{\min})}; \tag{16}$$

$$\text{для } r < -1 \qquad \sigma_e = 0{,}84\sigma_{\max} - 0{,}56\sigma_{\min}; \tag{17}$$

де $\sigma_{\max}$, $\sigma_{\min}$ – головні напруження, які визначаються з розрахунку конструкції на статичне навантаження вибирається основний ступінь міцність за формулою (5), причому $\sigma_{\max} = \sigma_2$, $\sigma_{\min} = \sigma_2$.

Після визначення σ_{ei} для всіх ступенів навантаження вибирається основний ступінь з найбільшою часткою ушкоджуваності, до якої приводяться всі інші:

$$n_e = n_{осн} + n_1\left(\frac{\sigma_{ei}}{\sigma_{eooc}}\right)^4 + \ldots + n_k\left(\frac{\sigma_{ek}}{\sigma_{eooc}}\right)^4, \tag{18}$$

де $n_{осн} = 1$, якщо як основний ступінь навантаження взятий повний цикл; n_i – число циклів у кожному з наведених ступенів програмного блоку.

Якщо дійсне число циклів j-го типу n_j, то витривалість деталі визначається однією з гіпотез підсумовування, серед яких найбільшого поширення набула лінійна [12]:

$$\sum_{j=1}^{k} \frac{n_j}{N_j} = 1. \tag{19}$$

Звідси випливає, якщо дійсне число циклів хоча б одного j-го типу перевищує відповідне межове, то права частина вже більше одиниці і відбудеться руйнування.

Тому для визначення можливості деталі забезпечити регламентований ресурс необхідно:

1) сформувати всі типові програмні блоки циклічного навантаження;

2) визначити (регламентувати) потрібну в експлуатації кількість еквівалентних циклів $n_{jекв}$ кожного з j програмних блоків;

3) для кожного з програмних блоків визначити межову кількість циклів $N_{jекв}$;

4) переконатися, що кожен із програмних блоків має місце нерівність $n_{jекв}/N_{jекв} \le 1$;

5) у разі $n_{jекв}/N_{jекв} \ge 1$ посилити деталь та знову провести процедури пп. 3 та 4;

6) перевірити відповідність витривалості деталі за весь термін експлуатації прийнятої гіпотези підсумовування ушкоджень.

При аналізі впливу залишкових технологічних напружень необхідно враховувати той факт, що технологічні напруження враховувати той факт, що технологічні напруження можуть по-різному впливати на ресурс деталі, наприклад в i-му програмному блоці може виявитися $k_{mj} = \dfrac{N_{jee}}{N_{je}} < 1$, тоді як в j-му $k_{mj} = \dfrac{N_{jee}}{N_{je}} > 1$. У зв'язку з цим виправдано запровадження таких параметрів:

$$\chi_e = \sum_{j=1}^{k} \frac{n_j}{N_j}, \chi_e \le 1, \tag{20}$$

$$\chi_{emm} = \sum_{j=1}^{k} \left(\frac{n_j}{N_{jem}} \right)_i ; \tag{21}$$

де χ_e – безпечний коефіцієнт ушкоджуваності деталі під час експлуатації за відсутності в ній технологічної спадковості; χ_{em} – коефіцієнт пошкоджуваності за весь термін експлуатації деталі з технологічною спадковістю; i – індекс технологічного процесу виготовлення деталей.

Якщо $\chi_{emm} > 1$, технологічний процес виготовлення деталі не відповідає критерію забезпечення забезпечення ресурсу і не може бути рекомендований без відповідного доопрацювання.

Якщо $\chi_{emm} \le 1$, то:

$$(\chi_{em})_{opt} = \min\{\chi_{emm}\}. \tag{22}$$

Вираз (22) є критерієм ефективності технологічного процесу ЗШВ, що враховує ресурс деталі в експлуатації.

Таким чином, проведений вище аналіз дозволяє зробити такі висновки.

ВИСНОВКИ

1. Отримано гранично допустимі значення напруженості для слабо, середньо та сильно навантажених деталей конструкції, що піддаються багатоцикловому навантаженню в процесі експлуатації літака. Ці значення напруженості можуть використовуватися як критерії прийнятності технологічного процесу ЗШВ або слугувати засадою його доопрацювання, що забезпечує зниження до допустимого рівня залишкових технологічних напружень.

2. Запропоновано критерій ефективності технологічного процесу ЗШВ, що враховує ресурс деталі в експлуатації. Цей критерій дозволяє вибрати оптимальний технологічний процес, а також провести для ранжованого ряду $\chi_{eti} \le 1$ комплексний аналіз раціональності технологічного процесу за прийнятими критеріями технологічності та економічної ефективності.

3. Запропонований критерій є досить загальним, оскільки ґрунтується на широко поширеній наразі лінійній гіпотезі підсумовування ушкоджень, він принципово не залежить від виду самої гіпотези і легко може бути адаптований до тієї, яка отримала найкраще експериментальне підтвердження для умов експлуатації літака та деталей, виготовлених із певного виду матеріалів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Бычков С. А., Павлов И. В., Сухов В. В. Количественная оценка заготовительно-штамповочного производства. УкрНИИАТ. 1996. 4 с. *Деп. в ГНТБ Украины* 17.12.96. № 276-Укр96.

2. Сухов В. В. Количественная оценка технологичности изделий в работах исследователей. УкрНИИАТ, 1996. 6 с. *Деп. в ГНТБ Украины* 02.12.96. № 234-Укр96.

3. Іванов В. В. Технологичность конструкций – резерв производства. Харьков: Прапор. 1968. 84 с.

4. Сухов В. В. Учет ресурса при оптимизации конструктивно-технологических параметров деталей. *Інформація та нові технології.* 1997. 1. С. 27–29.

5. Бронз Л. Д. Технология и обеспечение ресурса самолетов. Москва: Машиностроение. 1986. 184 с.

6. Одинг И. А. Допустимые напряжения в машиностроении и циклическая прочность металлов. Москва: Машиностроение. 1962. 185 с.

7. Гайдачук В. Е. О допустимом уровне напряженности деталей авиаконструкций, возникающей при их производстве или ремонте упругим деформированием. *Самолетостроение. Техника воздушного флота*. 1987. 54. С. 79–83.

8. Хилл Р. Теория механических свойств волокнистых композитных материалов. *Механика.* 1966. 2. С. 131–149.

9. Шваб'юк В. І. Опір матеріалів: Підручник. Київ: Знання. 2016. 400 с.

10. Bhavikatti S. S. Strength of materials. Fourth edition. Vikas Punblishing House. 2013. 483 p.

11. Иванков И. Е. К вопросу долговечности авиационных конструкций. Рига: РКИИГА. 1971. 7. С. 82–84.

12. Гудков А. И., Лемашов П. С. Внешние нагрузки и прочность летательных аппаратов. Москва: Машиностроение. 1987. 470 с.

13. Гасснер Е., Якоби Г. Испытание на выносливость с целью определения допустимых расчетных напряжений в нижней панели крыла транспортного самолета. *Сб. ЦАГИ*. 1965. 146. С. 18–19.

14. Стефанов Р. И. Выносливость тонколистовых алюминиевых сплавов Д16Т и АМГ6-БМ при линейном и плоском напряженном состоянии в условиях высокочастотного нагружения. *Проблемы прочности*. 1977. 7. С. 55–57.

15. Кулешов Д. Я. Влияние частоты нагружения на выносливость легких сплавов. *Сб. Работ по выносливости авиационных конструкций*. Москва: ЦАГИ. 1972. 1419. С. 79–81.

16. Редковец Н. Ф. К вопросу о выборе параметров программ усталостных испытаний деталей самолетных конструкций. *Сб. Прочность и долговечность авиационных конструкций*. Киев: КИИГА. 1965.

17. Степанов М. Н., Гиацинтов Е. В. Усталость легких конструкционных сплавов. Москва: Машиностроение. 1973. 128 с.

REFERENCES

1. Bychkov S.A., Pavlov I.V., Sukhov V.V. Quantitative assessment of blanking and stamping production. UkrNIIAT. 1996. 4 p. *Dep. in the State scientific and technical library of Ukraine* 12.17.96, No. 276-Ukr96. *(in Russian).*

2. Sukhov V.V. Quantitative assessment of manufacturability of products in the works of researchers. UkrNIIAT, 1996. 6 p. *Dep. in the State scientific and technical library of Ukraine* 02.12.96, No. 234-Ukr96. *(in Russian).*

3. Ivanov V.V. The manufacturability of structures is a reserve of production. Kharkov: Prapor, 1968. 84 p. *(in Russian).*

4. Sukhov V.V. Accounting for the resource when optimizing the design and technological parameters of parts. *Information and new technologies*. 1997. 1, pp. 27 - 29. *(in Russian).*

5. Bronze L.D. Technology and maintenance of the aircraft resource. Moscow: Mashinostroenie. 1986. 184 p. *(in Russian).*

6. Oding. I.A. Permissible stresses in mechanical engineering and cyclic strength of metals. Moscow: Mashinostroenie. 1962. 185 p. *(in Russian).*

7. Gaidachuk V.E. On the permissible level of tension of aircraft structure parts arising during their production or repair by elastic deformation. *Samoletostroenie. Aircraft technology*. 1987. 54, pp. 79-83. *(in Russian).*

8. Hill R. Theory of mechanical properties of fibrous composite materials. *Mechanics*. 1966. 2, pp. 131–149. *(in Russian).*

9. Shvab'yuk V.I. Strength of materials. Kyiv: Znannya. 2016. 400 p. *(in Ukrainian).*

10. Bhavikatti S.S. Strength of materials. Fourth edition. Vikas Punblishing House. 2013. 483 p.

11. Ivankov I.E. On the issue of durability of aircraft structures. Riga: RKIIGA. 1971. 7, pp. 82-84. *(in Russian).*

12. Gudkov A.I., Lemashov P.S. External loads and strength of aircraft. Moscow: Mashinostroenie. 1987. 470 p. *(in Russian).*

13. Gassner E., Jacobi G. Endurance test to determine the allowable design stresses in the lower wing panel of a transport aircraft. *Sat. TsAGI*. 1965. 146, pp. 18-19. *(in Russian).*

14. Stefanov R.I. Endurance of thin-sheet aluminum alloys D16T and AMG6-BM under linear and plane stress state under high-frequency loading. *Problems of strength*. 1977. 7, pp. 55-57. *(in Russian).*

15. Kuleshov D.Ya. Influence of loading frequency on the endurance of light alloys. *Sat. Works on the endurance of aircraft structures*. Moscow: TsAGI. 1972. 1419, pp. 79-81. *(in Russian).*

16. Redkovets N.F. To the question of the choice of parameters for fatigue testing programs for parts of aircraft structures. *Sat. Strength and durability of aircraft structures*. Kyiv: KIIGA. 1965. *(in Russian).*

17. Stepanov M.N., Giatsintov E.V. Fatigue of light structural alloys. Moscow: Mashinostroenie. 1973. 128 p. *(in Russian).*

Sukhov V., Kabanyachyi V. Resource assessment of details at the design stage and analysis of technological processes efficiency of blanking and punching production

The criterion for evaluating the technological process efficiency of blanking and punching production, which takes into account of the operation part resource, is developed in article. The criterion was developed on the basis of the assessing method of the allowable tension of aircraft structure parts that occurs during its production or repair. The tension at a point was understood as the relative value of the stress state acting on it, referred to the limits of static strength in the general case of an orthotropic material, and described by Hill's criterion. In accordance with modern ideas about the durability of structural materials, it was assumed that cracks are located across the main tensile stress (the largest), that is, mainly tensile main stresses are responsible for the appearance and development of cracks. Maximum allowable stress values for weakly, moderately and strongly stressed structural parts subjected to multi-cycle loading during aircraft operation were obtained. These stress values can be used as criteria for the acceptability of the

technological process of blanking and punching production or serve as the basis for its refinement, which ensures a reduction to an acceptable level of residual technological stresses. The proposed criterion of the technological process efficiency of the blanking and punching production, which takes into account the operation part resource, allows to choose the optimal technological process, as well as to conduct a comprehensive analysis of technological process rationality according to the accepted criteria of manufacturability and economic efficiency. The proposed criterion is quite general, as it is based on the currently widespread linear hypothesis of damage summation, it is fundamentally independent of the type of hypothesis itself and can easily be adapted to the one that received the best experimental confirmation for the operating conditions of the aircraft and parts made of a certain type of materials.

***Key words**: blanking and punching production, technological process, efficiency evaluation criterion, part resource, part tension.*

Сухов В. В., Кабанячий В. В. Оценка ресурса деталей на стадии проектирования и анализ эффективности технологических процессов заготовительно-штамповочного производства

В работе разработан критерий оценки эффективности технологического процесса заготовительно-штамповочного производства, учитывающий ресурс детали в эксплуатации. Критерий разрабатывался на основе метода оценки допустимой напряженности деталей авиаконструкций, возникающего при ее производстве или ремонте. Под напряженностью в точке понималась относительная величина действующего в ней напряженного состояния, отнесенная к границам статической прочности в общем случае ортотропного материала, и описанная критерием Хилла. Согласно современным представлениям о выносливости конструкционных материалов принималось, что трещины располагаются поперек растягивающего главного напряжения (наибольшего), то есть ответственными за возникновение и развитие трещин преимущественно растягивающие главные напряжения. Получены предельно допустимые значения напряженности для слабо, средне и сильно напряженных деталей конструкции, подвергающихся многоцикловой нагрузке в процессе эксплуатации самолета. Эти значения напряженности могут использоваться в качестве критериев приемлемости технологического процесса заготовительно-штамповочного производства или служить основой его доработки, что обеспечивает снижение до допустимого уровня остаточных технологических напряжений. Предлагаемый критерий эффективности технологического процесса заготовительно-штамповочного производства, учитывающий ресурс детали в эксплуатации, позволяет выбрать оптимальный технологический процесс, а также провести комплексный анализ рациональности технологического процесса по принятым критериям технологичности и экономической эффективности. Предлагаемый критерий является достаточно общим, поскольку основывается на широко распространенной линейной гипотезе суммирования повреждений, он принципиально не зависит от вида самой гипотезы и легко может быть адаптирован к той, которая получит наилучшее экспериментальное подтверждение для условий эксплуатации самолета и деталей, изготовленных из определенного вида материалов.

***Ключевые слова**: заготовительно-штамповочное производство, технологический процесс, критерий оценки эффективности, ресурс детали, напряженность детали.*

Сухов Віталій Вікторович – д-р техн. наук, професор, НТУУ "КПІ ім. Ігоря Сікорського"
Sukhov Vitaly – Dr. Tech. Sciences, Professor, NTUU "I. Sikorsky KPI"
Сухов Виталий Викторович – д-р техн. наук, профессор, НТУУ "КПИ им. Игоря Сикорского"
E-mail: sykhovkpi@gmail.com
ORCID: 000-0002-4151-605X

Кабанячий Володимир Володимирович – д-р техн. наук, НТУУ "КПІ ім. Ігоря Сікорського"
Kabanyachyi Volodymyr – Dr. Tech. Sciences, NTUU "I. Sikorsky KPI"
Кабанячий Владимир Владимирович – д-р техн. наук, НТУУ "КПИ им. Игоря Сикорского"
E-mail: v.kabaniachyi@kpi.ua
ORCID: 0000-0003-0170-3923

НТУУ "КПІ ім. Ігоря Сікорського" – Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", м. Київ
NTUU "I. Sikorsky KPI" – National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv
НТУУ "КПИ им. Игоря Сикорского" – Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского", г. Киев

Стаття надійшла до редакції 10.06.22 р.

УДК 004.942 DOI: 10.37142/2076-2151/2022-1(51)214

Алтухов О. В.
Тарасов О. Ф.

РОЗРОБКА ПРОГРАМНИХ КОМПОНЕНТІВ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ІНТЕНСИВНОГО ПЛАСТИЧНОГО ДЕФОРМУВАННЯ НА ОСНОВІ ПАРАМЕТРИЧНОЇ МОДЕЛІ ОСНАЩЕННЯ

Проаналізовано тенденції та підходи, які використовуються під час розробки інтегрованих систем автоматизованого проектування (ІСАПР) нових технологічних процесів та штампового оснащення для обробки металів тиском (ОМТ), зокрема процесів інтенсивного пластичного деформування (ІПД). Проведено аналіз проблем промислового впровадження процесів ІПД, що дозволило сформулювати вимоги до функцій компонентів ІСАПР, які розроблені. На основі методології об'єктно-орієнтованого програмування (ООП) і мови Unified Modeling Language (UML) виконано проектування структури ІСАПР процесів ІПД, яка включає ряд компонентів для моделювання процесу і проектування штампового оснащення. Наведено структуру ІСАПР процесів ІПД, яка містить CAD/CAE-системи як зовнішні модулі.

Проведено оцінювання можливостей сучасних CAD-систем для формування збірних одиниць оснащення на основі параметричної моделі деталей. Виконано аналіз різних підходів при побудові параметричних моделей для використання в ІСАПР штампового оснащення. Розроблено параметричну модель зв'язків елементів штампового оснащення процесу ІПД на прикладі модифікованого реверсивного зсуву (РЗ). Параметрична модель розроблена на основі табличного підходу, що включає зв'язки параметрів заготовки, матриці, пуансона та виштовхувача. Ця таблиця забезпечує перебудову геометрії штампового оснащення в залежності від розмірів заготовки. Наведено етапи створення параметричної моделі збірної одиниці штампу для процесу ІПД на прикладі модифікованого РЗ. Створено компонент ІСАПР для проектування штампового оснащення на основі його параметричної моделі, який використовує API CAD-системи SolidWorks. Наведено інтерфейс розробленого компоненту ІСАПР для побудови в SolidWorks збірки штампу на прикладі робочого інструменту для процесу модифікованого РЗ.

Ключові слова: *інтенсивна пластична деформація, штампове оснащення, таблична параметризація, інтеграція, САПР, параметрична модель, CAD*

Інтегровані системи автоматизованого проектування процесів ОМТ, зокрема процесів ІПД використовуються у промисловості та при проведенні наукових досліджень з метою зменшення витрат на розробку нових процесів та проектування штампового оснащення. Найбільш вдалим прикладом є розробка САПР процесів ІПД, яка передбачає інтеграцією з сучасними CAD/CAE - системами, що дозволяє значно скоротити терміни розробки ІСАПР та отримання сумісності з промисловими стандартами тривимірної графіки [1, 2]. В тому числі, для вирішення ряду завдань проектування процесів ІПД авторами розроблено компоненти ІСАПР, ряд з яких розглянуто в роботі [1].

Стрімкий розвиток інтернет технологій та поширення хмарних сервісів дозволяє розміщення у мережі компонентів ІСАПР для їх віддаленого використання. Це спрощує обслуговування, супровід та доступ до обчислювальних потужностей, на яких виконується ІСАПР, а також запобігає неліцензійному використанню програмного забезпечення [3-5].

Останнім часом розробники ІСАПР процесів ОМТ включають до складу своїх систем методи штучного інтелекту для підвищення рівня інтелектуальності, що дозволяє також отримувати більш якісні технічні рішення під час проектування. Серед методів штучного інтелекту, які використовуються в промислових ІСАПР, слід відзначити застосування баз знань та експертних систем [6, 7], евристичних алгоритмів для генерації та оптимізації конструкцій під час проектування [8]. Для підвищення ефективності створення нових технічних рішень необхідні системи, які будуть використовувати модель середовища з підтримкою опису структури та поведінки об'єкту проектування [9]. У результаті аналізу технічної проблеми повинні формуватися функціональні вимоги до об'єкту проектування, в якому планується їх реалізувати [10]. Але на даний час відсутні повністю впроваджені реалізації ІСАПР для формування концептуальної моделі об'єкту проектування, технічних рішень для всіх елементів та конструкції загалом.

Процеси ІПД дозволяють підвищувати фізико-механічні властивості існуючих металів та їх сплавів, що дає гарні перспективи впровадження в промисловості [11]. Однак існують

декілька проблем, які стримують широке розповсюдження процесів ІПД в промисловості. До таких проблем відносяться: високі навантаження на інструмент, що призводить до обмеження розмірів заготовок, які обробляються, вимоги до пластичності матеріалів, які використовуються для обробки, та складність дослідження нових процесів з пошуком оптимальних параметрів [12].

Автоматизація проектування більшості процесів ІПД залишається проблемою при виконанні досліджень, що обмежує їх впровадження в промислових масштабах. Проведення теоретичних досліджень процесів ІПД засобами CAE-систем [13], на відміну від натурних експериментів, дозволяє швидко виконати моделювання і значно зменшити час пошуку оптимальних параметрів технологічного процесу. Параметри процесу включають види та послідовність операцій, геометрію та характеристики матеріалів заготовки і інструменту, температурні режими, умови тертя на поверхнях та інше. При цьому для знаходження оптимальних параметрів технічного рішення виконується ряд розрахунків зі зміною вибраних параметрів, що призводить до зміни розмірів заготовки та штампового оснащення. В існуючих ІСАПР найчастіше підготовку геометрії всіх частин інструменту при проектуванні виконують у ручному режимі і витрачають для цього досить багато часу [14]. Тому розробка ІСАПР процесів ІПД з можливістю формувати моделі та передавати збірні одиниці штампового оснащення в CAD-системи для візуалізації є актуальним питанням.

Розробка програмного забезпечення для автоматизації проектування процесів ІПД можлива на базі промислових CAD/CAE-систем, що підтримують відкриті інтерфейси для розробки зовнішніх модулів. Сучасні CAD/CAE-системи мають можливості для створення зовнішніх модулів при автоматизації різних технологічних процесів, що дозволяє адаптувати їх для проектування широкого спектра складних завдань, включаючи процеси ІПД. Автоматизація моделювання процесів ІПД за допомогою зовнішніх модулів для CAE-систем широко використовується на підприємствах і дозволяє суттєво скоротити час на підготовку моделі процесу, виконання моделювання та на аналіз результатів [1]. Однак процесу автоматизації проектування штампового оснащення не приділяється достатня увага, а це, у свою чергу, викликає додаткові витрати часу і не дає можливості повністю перейти на використання ІСАПР процесів ІПД. Створення геометричних моделей штампового оснащення дозволить скоротити час на підготовку моделі процесу та після отримання задовільних результатів моделювання технологічного процесу отримати креслення оснастки для виготовлення промислового інструменту.

Проектування складних схем ІПД в автоматизованих системах вимагає безліч ітерацій. При цьому фахівець витрачає більшість свого часу не на саме проектування, а на перебудову існуючої моделі і виправлення помилок. Засобом для автоматизації подібних ітеративних завдань є параметричних підхід. В даний час параметричні можливості в CAD-системах вважаються невід'ємною їх частиною. Такі системи дозволяють будувати асоціативні моделі і збірки, а також створювати користувальницькі параметричні бібліотеки. При параметричному підході на перший план виходять такі параметри, як розміри, залежності та обмеження. Модель при цьому будується схематично, що дозволяє прискорити процес.

Існує поділ видів параметризації (за ступенем свободи накладених зв'язків) на м'які (таблична і ієрархічна моделі) і жорсткі (варіаційна і геометрична моделі) [15, 16]. При жорсткій параметризації в моделі повністю задані всі зв'язки. Зміна геометричної моделі відбувається за рахунок характеру зв'язків і чіткого порядку їх накладення. Це виконується відповідно до дерева побудови. Для жорсткої параметризації характерний випадок, при якому рішення може не буде знайдено через конфлікт зв'язків. При м'якій параметризації перебудова геометричної моделі відбувається за рахунок вирішення нелінійних рівнянь, що описують взаємозв'язок в моделі.

При створенні збірних одиниць на основі параметричних моделей виникає низка проблем, таких як складні зв'язки між збірними одиницями, які створюють проблеми при необхідності зміни однієї з одиниць; погано керована конфігурація, що описує зв'язки між одини-

цями та недостатні залежності, які призводять до втрати форми або розмірів при ручному редагуванні збірки. Для побудови збірки штампової оснастки ІПД зручнішим способом є розробка параметричної моделі на основі варіаційного або табличного підходів [16, 17], що дозволяє простіше відстежувати зв'язки між збірними одиницями. Прив'язка внутрішніх розмірів штампової оснастки виконується до розмірів заготовки, що обробляється, проте можлива і прив'язка зовнішніх розмірів до розмірів робочого простору певних моделей обладнання. Сучасна тенденція при розробці збірок полягає у використанні простих залежностей для зв'язків між збірними одиницями, а також відстеження обмежень та конфігурації, що дозволяє отримати керовану збірну одиницю на основі параметричної моделі. На даний момент такий підхід використовується не у всіх промислових CAD-системах, що ускладнює роботу зі збіркою та вимагає розробки зовнішнього програмного забезпечення для автоматизації проектування процесів ІПД на основі параметричної моделі.

Таким чином, розробка ІСАПР проектування процесів ІПД з використанням методології UML є актуальною задачею, що дозволить зв’язати процеси проектування, пошуку оптимальних параметрів технологічного процесу та отримання креслень штампового оснащення. Для цього необхідно створення набору компонентів із загальним інтерфейсом і набором функцій, що забезпечить їх взаємодію під управлінням єдиної оболонки, яка інтегрована з CAD-системою.

Автоматизація проектування штампового оснащення для експериментального дослідження процесів ОМТ, зокрема ІПД за схемою модифікованого реверсивного зсуву [18] вирішена шляхом створення ІСАПР на базі промислових CAD/CAE-систем: CAD-системи DS SolidWorks та CAE-системи ABAQUS. Для забезпечення повного циклу проектування з використанням ІСАПР, треба включати в її склад ряд підсистем, які забезпечують створення деталей штампового оснащення та формування збірок. Особливо це необхідно для штампів складної конструкції, які включають декілька збірок. Найбільш повний набір компонентів таких ІСАПР включає підсистеми інженерного аналізу CAE для аналізу напружено-деформованого стану заготовок та розрахунків конструкцій на міцність, як правило на базі методу скінчених елементів.

Метою роботи є розробка компоненту ІСАПР з використанням об’єктно-орієнтованого підходу для побудови збірних одиниць штампового оснащення процесів ІПД на основі їх параметричної моделі.

Для опису структури ІСАПР процесів ІПД використано уніфіковану мову UML, яка дозволяє схематично представити склад та взаємодію компонентів системи. Структура спроектованої ІСАПР процесів ІПД наведена на рис. 1. Головним є модуль роботи з користувачем та прийняття рішень, який містить базу процесів ІПД, пропонує користувачу процеси ІПД відповідно до висунутих вимог й приймає вибір користувача для подальшого проектування процесу. Модуль роботи з користувачем та прийняття рішень взаємодіє з модулем роботи з CAE і передає до нього модель обраного процесу ІПД для моделювання та проведення досліджень процесу з різними параметрами. Для взаємодії безпосередньо з CAE-системою використовується модуль Python script, який відповідає за підготовку коду для автоматичної побудови розрахункової моделі в CAE-системі Abaqus. Після формування скрипта на мові Python для обраної моделі відбувається її передача в CAE-систему Abaqus за допомогою Windows Shell.

Після проведення досліджень обраного процесу ІПД за допомогою CAE, користувач обирає найкращий варіант та переходить до створення геометричної моделі штампового оснащення. Модуль роботи з CAD отримує параметричну модель обраного процесу ІПД та створює проект штампового оснащення, але перед створенням геометричної моделі, при необхідності, є можливість скорегувати розміри елементів конструкції. Після підтвердження розмірів відбувається перевірка коректності параметричної моделі та побудова геометричної моделі штампового оснащення. Після цього модель передається в CAD-систему. Таким чином, взаємодія між компонентами ІСАПР базується на відкритих програмних інтерфейсах або бібліотеках вбудованих функцій.

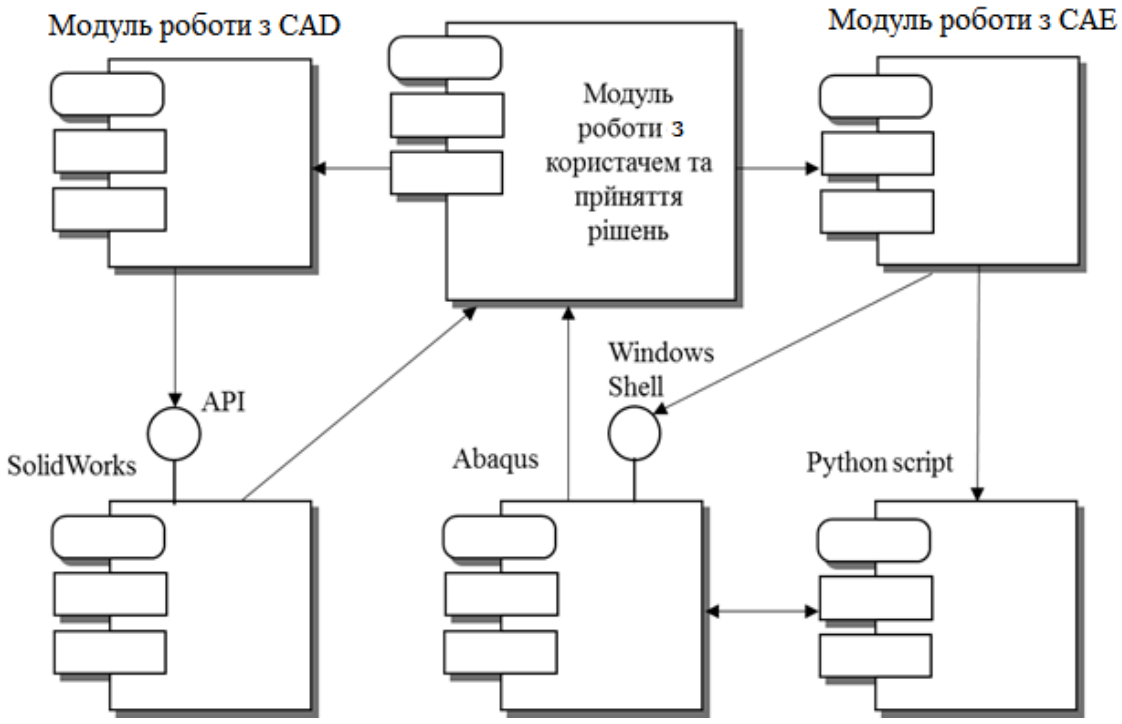


Рис. 1. Діаграма компонентів ІСАПР процесів ІПД на основі промислових CAD/CAE-систем

Для опису структури ІСАПР процесів ІПД використано уніфіковану мову UML, яка дозволяє схематично представити склад та взаємодію компонентів системи. Функціональність системи розділена для реалізації у вигляді функцій між класами системи, які зв'язані між собою для сумісної роботи, за Діаграма класів ІСАПР процесів ІПД показує, що основним класом є AiCAD SPD, з якого успадковуються класи SPD Process, WorkPiece та ParametricModel, містять функції для обробки даних про процеси ІПД, про типи заготовок та параметричні моделі процесів ІПД відповідно. Клас Modeling включає функції для запуску процесу моделювання в CAE та отримання його результатів. Класи GeometryModel і ParametricModel відповідають у системі за формування геометричної моделі штампового оснащення на основі параметричної моделі обраного процесу ІПД. Клас Analize відповідає за аналіз результатів моделювання в CAE, Optimization виконує пошук оптимальних параметрів обраного процесу ІПД. Ряд класів виконують обробку результатів розрахунків або експериментальних досліджень: клас Microstructure містить функції обробки мікроструктури отриманих зразків, Graphics відповідає за побудову графіків з результатами досліджень обраного процесу ІПД,. Клас Experiment реалізує програму експериментальних досліджень впливу параметрів технологічного процесу на результати розрахунку напружено-деформованого стану заготовки в процесі формозміни.

Розроблений компонент ІСАПР для проектування штампового оснащення процесу ІПД використовує параметричну модель, що дає можливість розширити варіативність виробів, які проектуються. Для ІСАПР обрано табличний спосіб параметризації, який часто використовується в подібних проектах. Параметрична модель штампового оснащення для процесу ІПД за схемою модифікованого реверсивного зсуву [18] наведена на рис. 2. У схему процесу ІПД модифікованого реверсивного зсуву входить типовий набір інструментів: дві частини матриці з внутрішньою порожниною (поз. 1, 2), пуансон (3), виштовхувач (4) і заготовка (5).

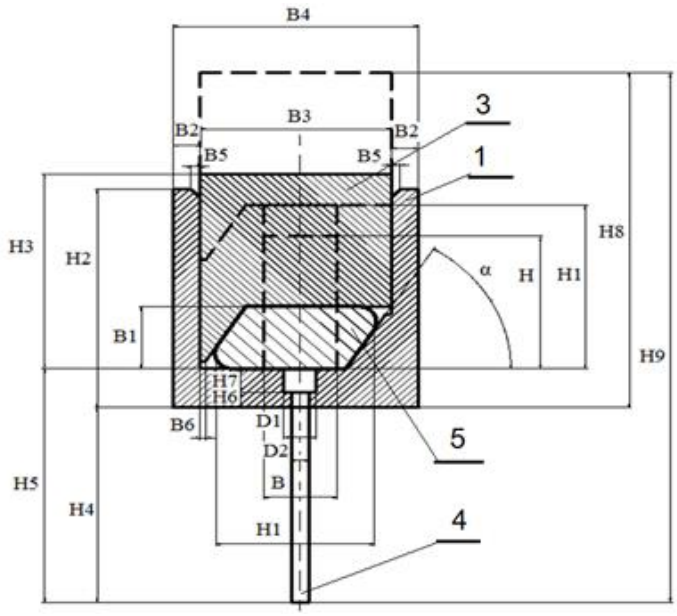


Рис. 2. Параметрична модель штампового оснащення для процесу ІПД за схемою модифікованого реверсивного зсуву:

1 – матриця; 3 – пуансон; 4 – виштовхувач; 5 – заготовка

Базовими розмірами є початкові розміри заготовки: висота H, ширина B і кут нахилу поверхонь пуансона і нижнього інструмента α, що деформують заготовку. Залежності інших розмірів від вихідних базових показано в табл. 1.

Таблиця 1

Таблиця залежностей між параметрами деталей (див. рис. 2)

Деталь	Параметр	Залежності або значення, мм	Деталь	Параметр	Залежності або значення, мм
Заготовка	H	80	Матриця	H7	10
	B	40		H8	H3+H5
	H1	H+B+tg(α)		H9	H8+H4
	B1	(H*B)/H1		B2	15
Матриця	α	60 градусів		B3	H1-10
	H2	H1+10+H6+H7		B4	B3+2*B2
	H3	H2+10		B5	5
	H4	H2+10		B6	3
	H5	H4+25		D1	B/2
	H6	15		D2	0.8*D1

Створення параметричних моделей збірних одиниць штампового оснащення виконується за кілька етапів. На першому етапі виконується введення розмірів заготовки (довжина, висота, ширина) та кутів нахилу деформуючих поверхонь пуансонів. Після введення розмірів виконується перевірка їхньої коректності. На другому етапі виконується розрахунок розмірів штампового оснащення (матриці та пуансону) за геометричною моделлю. На третьому етапі виконується перевірка коректності геометрії, що включає перевірку на обмеження пов’язані

з іншими збірними одиницями, наприклад, з розмірами штампового блока. На четвертому етапі виконується формування масиву параметрів деталей для передачі в CAD-систему. На п'ятому етапі виконується запуск CAD - системи. На останньому етапі виконується побудова деталей та зборка штампового оснащення в CAD-системі. Після цього можливе редагування окремих деталей у CAD-системі, в якості якої використовували DS SolidWorks.

При реалізації компонента, який забезпечує зв'язок ІСАПР з промисловою CAD - системою DS SolidWorks використовували її вбудований набір функцій API [19]. Для успішної взаємодії розробленого компонента ІСАПР з CAD - системою версії MS Visual Studio та DS SolidWorks повинні бути не старіше за 2015 рік.

На рис. 3 наведено інтерфейс розробленого компонента ІСАПР процесів ІПД для побудови геометричної моделі штампового оснащення для обраного процесу. Для обраного процесу ІПД побудова моделі в ІСАПР починається з вибору елемента меню «Геометрія». На формі (у лівій частині) розміщено поля для редагування початкових розмірів, якщо це необхідно, та елементи вибору для деталей у збірці. Після побудови моделі відбувається перевірка розмірів, побудова геометричної моделі та передача її у CAD-систему (кнопка «Передати у CAD»).

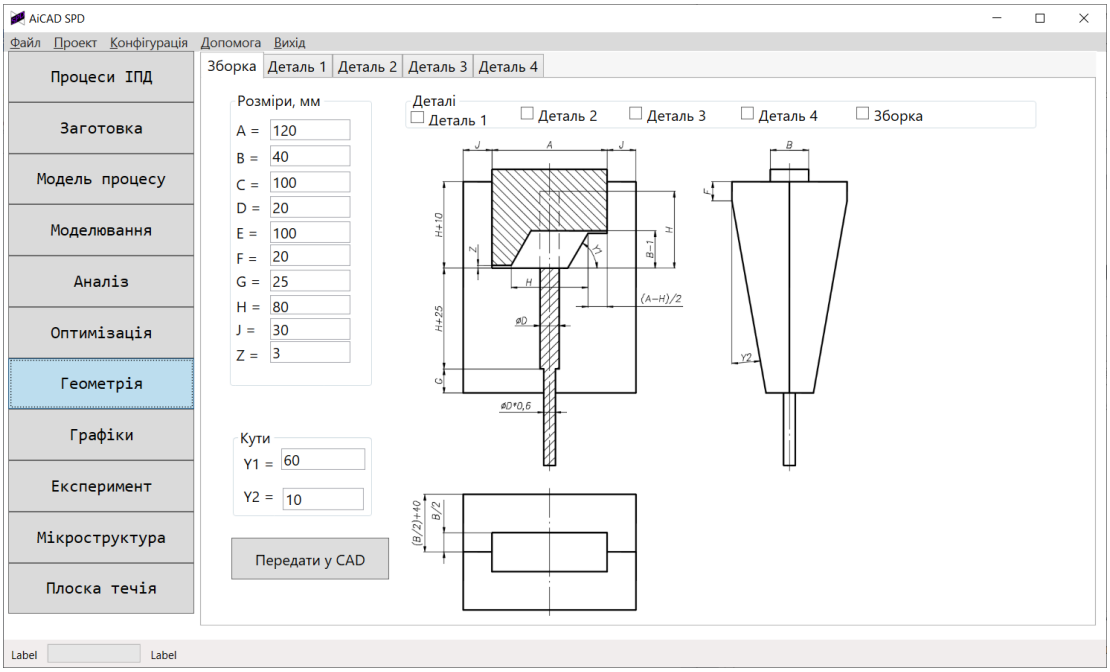


Рис. 3. Інтерфейс розробленого компонента ІСАПР процесів ІПД для побудови геометричної моделі штампового оснащення

На рис. 4 наведено результат роботи компонента ІСАПР у вигляді побудованої моделі частини матриці (рис. 4а) та всієї збірної одиниці робочого інструменту для реалізації технології ІПД (рис. 4б). Послідовність формування зборки наступна: спочатку будуються частини матриці, потім пуансон і останнім виштовхувач.

Розроблений компонент є частиною ІСАПР процесів ІПД, який використовується на заключному етапі роботи після проведення досліджень ефективності процесу деформування для створення конструкторської документації штампового оснащення з заданими параметрами.

У процесі створення компоненту ІСАПР для процесів ІПД було використано методологію ООП та мову UML для проектування структури компонентів. Розглянуто підхід при створенні ІСАПР процесів ІПД на основі відкритих інтерфейсів промислових CAD-систем. В результаті сформовано методику взаємодії з промисловою CAD-системою SolidWorks на основі її програмного інтерфейсу, а також розроблено набір функцій для формування збірних одиниць штампового оснащення на основі параметричної моделі процесу ІПД. Розроблене

програмне забезпечення може бути використане для вирішення загальних завдань проектування штампового оснащення, як процесів ІПД так і ОМТ. Розроблений компонент ІСАПР процесів ІПД дозволив отримати комплексне рішення та сформувати цикл розробки технологічного процесу ІПД починаючи з його вибору до отримання геометричної моделі штампового оснащення. У результаті проведеної роботи обрані параметри штампового оснащення, розроблена та виготовлена оснастка для проведення експерименту.

а б

Рис. 4. Результат побудови геометричних моделей елементів штампу:
а – частина матриці; б – робочий інструмент (збірна одиниця штампового оснащення);
1 – матриця; 2 – матриця; 3 – пуансон; 4 – виштовхувач

ВИСНОВКИ

1. Виконано аналіз сучасних тенденцій та підходів розробки ІСАПР штампового оснащення для процесів ОМТ, зокрема процесів ІПД, що дозволило сформулювати вимоги до функцій компоненту, який забезпечує побудову геометричної моделі штампового оснащення обраного процесу ІПД. Проаналізовано проблеми промислового впровадження як процесів ІПД, так і ІСАПР, які пов’язані з відсутністю підтримки параметризації та автоматизованої передачі інформації з CAD-систем до CAE-систем. Цей аналіз дозволив сформулювати вимоги до функцій компонентів ІСАПР.

2. Розроблено структуру ІСАПР з використанням методології ООП та мови UML. ІСАПР процесів ІПД виконує наступне: забезпечує вибір процесу ІПД по параметрам заготовки, моделювання у CAE-системі, вибір оптимальних параметрів обраного процесу ІПД, формування збірної одиниці штампового оснащення обраного процесу ІПД на основі його параметричної моделі, передачу розрахованих параметрів моделі в CAD-систему.

3. Розроблено параметричну модель штампового оснащення для процесу ІПД по схемі комбінованого реверсивного зсуву з використанням табличної параметризації, яка включає заготовку, дві частини матриці, пуансон та виштовхувач. Розгляд процесу проектування дозволив розробити загальний підхід до автоматизації проектування типового штампового оснащення процесів ІПД. Експериментально перевірено роботоспроможність параметричної моделі та підтверджено, що вона дозволяє забезпечити побудову штампового оснащення у широкому діапазоні розмірів, використовувати штампове оснащення та ІСАПР на значному спектрі ковальсько-пресового обладнання. Використання параметричної моделі дозволяє масштабувати розміри заготовок, що спрощує розрахунки для ряду заготовок с наступним аналізом напружено-деформованого стану.

4. Розглянуто етапи створення параметричної моделі збірної одиниці штампового оснащення для процесу ІПД. Реалізовано компонент ІСАПР для побудови штампового оснащення на основі параметричної моделі процесу ІПД по схемі комбінованого реверсивного зсуву в CAD-системі DS SolidWorks. Використання розвиненого програмного інтерфейсу

DS SolidWorks дозволяє автоматизувати побудову збірних одиниць штампового оснащення, що значно зменшує час підготовки конструкторської документації.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Тарасов О. Ф., Алтухов О. В., Сагайда П. І., Васильєва Л. В., Аносов В. Л. Автоматизоване проектування і виготовлення виробів із застосуванням CAD/CAM/CAE-систем: монографія. Краматорськ: ЦТРІ «Друкарськіий дім». 2017. 239 с.

2. Zhi-Xin J., Hong-Lin L., Xue-Chang Z., Ji-Qiang L., Bo-Jie C. Computer-aided structural design of punches and dies for progressive die based on functional component. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2011. 54(9-12), pp. 837–852 DOI: 10.1007/s00170-010-3006-7

3. Zissis D., Lekkas D., Azariadis P., Papanikos P., Xidias E. Collaborative CAD/CAE as a cloud service. *International Journal of Systems Science: Operations & Logistics*. 2016, pp. 1–17 DOI: 10.1080/23302674.2016.1186237

4. Ihara Y., Hashimoto G., Okuda H. Web-based integrated cloud CAE platform for large-scale finite element analysis. *Mechanical Engineering Letters*. 2017. 3, pp. 1-8. DOI: 10.1299/mel.17-00520.

5. Deng Z., Zhang J., Yin H. Architecture of cloud platform for CAE simulation in supercomputing environment. *International Journal of High Performance Systems Architecture*. 2016. 6 (3), pp. 131–142 DOI: 10.1504/ijhpsa.2016.080656.

6. Rahulkumar S. H. Advances in metal forming. expert system for metal forming. Springer. 2015. 126 p. ISBN 978-3-662-44496-2.

7. Kulon J., Mynors D.J., Broomhead P. A knowledge-based engineering design tool for metal forging. *Elsevier Science*. 2006. 177 (1-3), pp. 331–335. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2006.04.062

8. Brecher C., Klein W., Tannert M. Optimization of multi-stage closed-die forging processes by coupled simulation of the machine and the forging processes. *Production Engineering*. 2010. 4 (2-3), pp. 279–286. DOI: 10.1007/s11740-010-0226-5.

9. Tarasov O., Vasylieva L., Altukhov O., Anosov V. Automation of the synthesis of new design solutions based on the requirements for the functionality of the created object. *Nine International Conference «Information Control Systems & Technologies» (ICST-2020)*. Odessa. Ukraine. September 24–26. 2020, pp. 161–175. CEUR-WS.org. http://ceur-ws.org/Vol-2711/paper13.pdf .

10. Lin, BT., Chang, MR., Huang, HL. et al. Computer-aided structural design of drawing dies for stamping processes based on functional features. *Int J Adv Manuf Technol.* 2009. 42, p. 1140. https://doi.org/10.1007/s00170-008-1670-7

11. Azushima A., Kopp R., Korhonen A. et al. Severe plastic deformation (SPD) processes for metals. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. 2008. 57. 2, pp. 716–735, https://doi.org/10.1016/j.cirp.2008.09.005.

12. Faraji G., Kim H. S., Kashi H. T. Severe plastic deformation: methods. *Processing and Properties. Elsevier*. 2018. 315 p. https://doi.org/10.1016/C2016-0-05256-7

13. Kuang-Hua C. Product performance evaluation with CAD/CAE. Elsevier. 2013. 537 p. ISBN: 978-0-12-398460-9.

14. Um D. Solid modeling and application: rapid prototyping. *CAD and CAE Theory*. Springer. 2016. 304 p. ISBN 978-3-319-21821-2.

15. Stan C., Zapciu M., Paraschiv M., Ungureanu M. 3D parametric modeling for complex parts generation. *Applied Mechanics and Materials*. 2013. 371, pp. 504–508. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amm.371.504

16. Ruchik T. D., Dhaval S. B., Kaushik P. M. 3D parametric modeling for product variants using case study on inner ring of spherical roller bearing. *Procedia Engineering*. 2013. 51, pp. 709–714.

17. DOI: 10.1016/j.proeng.2013.01.101.

18. Potocnik D., Dolsak B., Ulbin M. GAJA: 3D CAD methodology for developing a parametric system for the automatic (re)modeling of the cutting components of compound washer dies. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A (Applied Physics & Engineering)*. 2013.14. 5, pp. 327-340. DOI: 10.1631/jzus.A1200245

19. Pat. 102513 Ukraine. The method of severe plastic deformation of the workpiece by deposition with a change in the direction of deformation. Tarasov O.F., Tarasov S.O.; Donbass State Engineering Academy. 2015. Nov 10. (in Ukrainian).

20. Пат. 102513 Україна, Спосіб інтенсивної пластичної деформації заготівки осадженням зі зміною напрямку деформування. О.Ф. Тарасов, С.О. Тарасов; Донбасская государственная машиностроительная академия. №a201505723; заявл. 10.06.2015; опубл. 10.11.2015, бюл. № 21.

21. Malpass L. SolidWorks 2009 API: Advanced product development. AngelSix. 2009. 246 p.

REFERENCES

1. Tarasov O. F., Altukhov O. V., Sagaida P. I., Vasylieva L. V., Anosov V. L. Automated design and manufacture of products using CAD/CAM/CAE systems: monograph. Kramatorsk: Central Research Institute "Printing House". 2017. 239 p. *(in Ukrainian).*

2. Zhi-Xin J., Hong-Lin L., Xue-Chang Z., Ji-Qiang L., Bo-Jie C. Computer-aided structural design of punches and dies for progressive die based on functional component. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2011. 54 (9–12), pp. 837–852 DOI: 10.1007/s00170-010-3006-7

3. Zissis D., Lekkas D., Azariadis P., Papanikos P., Xidias E. Collaborative CAD/CAE as a cloud service. *International Journal of Systems Science: Operations & Logistics*. 2016, pp. 1–17 DOI: 10.1080/23302674.2016.1186237

4. Ihara Y., Hashimoto G., Okuda H. Web-based integrated cloud CAE platform for large-scale finite element analysis. *Mechanical Engineering Letters*. 2017. 3, pp. 1–8. DOI: 10.1299/mel.17-00520.

5. Deng Z., Zhang J., Yin H. Architecture of cloud platform for CAE simulation in supercomputing environment. *International Journal of High Performance Systems Architecture*. 2016. 6 (3), pp. 131–142 DOI: 10.1504/ijhpsa.2016.080656.

6. Rahulkumar S. H. Advances in metal forming. expert system for metal forming. Springer. 2015. 126 p. ISBN 978-3-662-44496-2.

7. Kulon J., Mynors D.J., Broomhead P. A knowledge-based engineering design tool for metal forging. *Elsevier Science*. 2006. 177 (1-3), pp. 331–335. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2006.04.062

8. Brecher C., Klein W., Tannert M. Optimization of multi-stage closed-die forging processes by coupled simulation of the machine and the forging processes. *Production Engineering*. 2010. 4 (2-3), pp. 279–286. DOI: 10.1007/s11740-010-0226-5.

9. Tarasov O., Vasylieva L., Altukhov O., Anosov V. Automation of the synthesis of new design solutions based on the requirements for the functionality of the created object. *Nine International Conference «Information Control Systems & Technologies» (ICST-2020)*. Odessa. Ukraine. September 24-26. 2020, pp. 161–175. CEUR-WS.org. http://ceur-ws.org/Vol-2711/paper13.pdf .

10. Lin, BT., Chang, MR., Huang, HL. et al. Computer-aided structural design of drawing dies for stamping processes based on functional features. *Int J Adv Manuf Technol.* 2009. 42, p. 1140. https://doi.org/10.1007/s00170-008-1670-7

11. Azushima A., Kopp R., Korhonen A. et al. Severe plastic deformation (SPD) processes for metals. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. 2008. 57. 2, pp. 716–735, https://doi.org/10.1016/j.cirp.2008.09.005.

12. Faraji G., Kim H. S., Kashi H. T. Severe plastic deformation: methods. *Processing and Properties. Elsevier*. 2018. 315 p. https://doi.org/10.1016/C2016-0-05256-7

13. Kuang-Hua C. Product performance evaluation with CAD/CAE. Elsevier. 2013. 537 p. ISBN: 978-0-12-398460-9.

14. Um D. Solid modeling and application: rapid prototyping. *CAD and CAE Theory*. Springer. 2016. 304 p. ISBN 978-3-319-21821-2.

15. Stan C., Zapciu M., Paraschiv M., Ungureanu M. 3D parametric modeling for complex parts generation. *Applied Mechanics and Materials*. 2013. 371, pp. 504–508. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amm.371.504

16. Ruchik T. D., Dhaval S. B., Kaushik P. M. 3D parametric modeling for product variants using case study on inner ring of spherical roller bearing. *Procedia Engineering*. 2013. 51, pp. 709–714.
DOI: 10.1016/j.proeng.2013.01.101.

17. Potocnik D., Dolsak B., Ulbin M. GAJA: 3D CAD methodology for developing a parametric system for the automatic (re)modeling of the cutting components of compound washer dies. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A (Applied Physics & Engineering)*. 2013.14. 5, pp. 327–340. DOI: 10.1631/jzus.A1200245

18. Pat. 102513 Ukraine. The method of severe plastic deformation of the workpiece by deposition with a change in the direction of deformation. Tarasov O.F., Tarasov S.O.; Donbass State Engineering Academy. 2015. Nov 10. (in Ukrainian).

19. Malpass L. SolidWorks 2009 API: Advanced product development. AngelSix. 2009. 246 p.

Altukhov O., Tarasov O. Development of software components for simulation of severe plastic deformation based on the parametric model of the die set

The trends and approaches used during the development of integrated computer-aided design (ICAD) of new technological processes and die set for metal forming (MF), in particular, processes of severe plastic deformation (SPD), are analyzed. Analysis of the industrial implementation of SPD processes problems was carried out. It made it possible to formulate the requirements for the functions of the developed ICAD components. On the basis of the methodology of object-oriented programming (OOP) and Unified Modeling Language (UML), the design of the ICAD structure of SPD processes was performed. The ICAD includes a number of components for process modelling and design of die sets. The structure of ICAD for SPD processes, which contains CAD/CAE systems as external modules, is presented.

An evaluation of the capabilities of modern CAD systems for the formation of prefabricated equipment units based on the parametric model of parts was carried out. An analysis of various approaches to the construction of parametric models for use in ICAD for the design of die sets was performed. A parametric model of the die set elements connections for the SPD process was developed using the example of a modified reverse shear scheme (RS). The parametric model is developed on the basis of a tabular approach, which includes relationships between the parameters of the billet, die, punch and ejector. This table provides a reconstruction of the die set geometry depending on the dimensions of the billet. The stages of creating a parametric model of a pre-assembled unit of a die set for the SPD process are given as an example of a modified RS scheme.

The ICAD component was created for the design of die sets based on their parametric models, which use the API of the SolidWorks CAD system. The interface of the developed ICAD component for building and visualization of die set assembly in SolidWorks is given, using the example of a working tool for the process of modified RS scheme.

Keywords: *severe plastic deformation, die set, tabular parameterization, integration, CAD, parametric model*

Алтухов А. В., Тарасов А. Ф. Разработка программных компонентов для моделирования интенсивного пластического деформирования на основе параметрической модели оснащения

Проанализированы тенденции и подходы, используемые при разработке интегрированных систем автоматизированного проектирования (ИСАПР) новых технологических процессов и штамповой оснастки для обработки металлов давлением (ОМД), в частности процессов интенсивного пластического деформирования (ИПД). Проведен анализ проблем промышленного внедрения процессов ИПД, что позволило сформулировать требова-

ния к функциям компонентов ИСАПР, которые разработаны. На основе методологии объектно-ориентированного программирования (ООП) и языка Unified Modeling Language (UML) выполнено проектирование структуры ИСАПР процессов ИПД, включающей ряд компонентов для моделирования процесса и проектирования штамповой оснастки. Приведена структура ИСАПР процессов ИПД, содержащая CAD/CAE-системы как внешние модули.

Проведена оценка возможностей современных CAD-систем для формирования сборных единиц оснастки на основе параметрической модели деталей. Выполнен анализ разных подходов при построении параметрических моделей для использования в ИСАПР штамповой оснастки. Разработана параметрическая модель связей элементов штамповой оснастки процесса ИПД на примере модифицированного реверсивного сдвига (РС). Параметрическая модель разработана на основе табличного подхода, включающего связки параметров заготовки, матрицы, пуансона и выталкивателя. Эта таблица обеспечивает перестройку геометрии штамповой оснастки в зависимости от размеров заготовки. Представлены этапы создания параметрической модели сборной единицы штампа для процесса ИПД на примере модифицированного РС. Создан компонент ИСАПР для проектирования штамповой оснастки на основе его параметрической модели, использующей API CAD-системы SolidWorks. Представлен интерфейс разработанного компонента ИСАПР для построения в SolidWorks сборки штампа на примере рабочего инструмента для процесса модифицированного РС.

Ключевые слова: *интенсивная пластическая деформация, штамповая оснастка, табличная параметризация, интеграция, САПР, параметрическая модель, CAD*

Алтухов Олександр Валерійович – канд. техн. наук, старший викл. ДДМА
Altukhov Oleksandr – candidate. technical of Sciences, Senior lecturer DSEA
Алтухов Александр Валерьевич – канд. техн. наук, старший преп. ДГМА
E-mail: astratsl@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6310-3272

Тарасов Олександр Федорович – д-р техн. наук, проф., зав. кафедрою ДДМА
Tarasov Oleksandr – Dr. Tech. Sciences, Full Professor , Head of Department DSEA
Тарасов Александр Федорович – д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой ДГМА
E-mail: alexandrtar50@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0493-1529

Стаття поступила до редакції 05.05.22 р.

DOI: 10.37142/2076-2151/2022-1(51)224

ANNIVERSARY OF THE DEPARTMENT OF METAL FORMING DSEA

The Department of Metal Forming (DMF) of the Donbass State Engineering Academy (DSEA) was formed in the Kramatorsk evening branch of the Donetsk Industrial Institute in 1956 (Order No. 675 of 08/28/1956) . In the first years, the department was headed by Associate Professor Ezhov G.I., then since 1960 - by Prof. Zolotukhin N.M. In the early 70s, the department was merged with the department "Machines and technologies of Metal Forming". In those years, Prof. Kaporovich V.G. and Associate Professor Golubyatnikov N.K., well-known specialists in the field of forging, worked there.

Nikolai Mikhailovich Zolotukhin (1918-1995) made a significant contribution to the development of the theory and technology of Metal Forming (MF), having developed the theory of metal heating before forging and stamping (monograph "Heating and cooling of metal", 1973). Professor Kaporovich Vladimir Georgievich (1932-1993) created a fundamentally new process of rolling tubular blanks (monographs "Running in the production of metal products", 1973; "Production of parts from pipes by running in", 1978).

Sokolov L.N.

Zolotukhin N.M.

Kaporovich V.G.

The newest history of the DMF department begins in 1976, when it was restored as an independent division of the Kramatorsk Industrial Institute (KII). The organizer of the day division of the department and the head of the department was Professor, D.Sc., Sokolov Lev Nikolaevich (1922-2011), who was appointed in 1975 as the rector of the institute.

From 1975 to 1988 Prof. Sokolov L.N. worked as a rector of the KII (now DSEA) and part-time Head of the Department of Metal Forming. His name is associated with the formation and development of the scientific school of KII-DSEA in the field of metal forming, which has made a significant contribution to the development of the theory, technology and equipment of forging and stamping production (FSP). The Department of Metal Forming (DMF) has turned into a major center for the development of FSP – a kind of creative laboratory, in which the scientific team of like-minded people conducted search, research and implementation work in various areas of the DMF. Professor Sokolov L. N. opened a scientific direction at the department related to the study of hot plastic deformation processes. The main scientific works were devoted to the study of softening of metals

and alloys in the process of hot deformation, forging large forgings from ingots and pressing secondary aluminum alloys. For 13 years, Honored Worker of the Higher School of Ukraine L.N. Sokolov was the chairman of a specialized council for the defense of doctoral dissertations in the specialty " Processes and Machines of Plastic Working", organized by them at KII. He also headed the "Mechanical Engineering" section of the Donetsk Scientific Center of the Academy of Sciences of the Ukrainian SSR and was a member of the expert council of the USSR Ministry of Higher Education for assessing the level of state budgetary work of universities and was a member of the editorial board of the main journal in the USSR specializing in Forging and Stamping Production.

Among the first teachers of the full-time department of the department were candidates of science Kulishov A.A., Laptev A.M. and Lukyanov V.I. Simultaneously with the organization of the department, at the beginning of the work of the council for the defense of doctoral and master's theses, postgraduate studies were opened at KII, where Tarasov A.F., Chubov S.G. were accepted. Solokha A.N., Diamantopulo K.K., Efimov V.N., Savchenko O.K. Since that time, the staff of the DMF department has been formed mainly due to the graduates of their postgraduate studies.

This year, the 65th anniversary of the Department of Metal Forming coincided with the anniversaries of the professors-heads of the department of different years: with the 100th anniversary of Sokolov L.M. and the 75th anniversary of Aliiev I.S.

An article about the 100th anniversary of Lev Nikolaevich Sokolov is given in this collection.

Aliiev Igramotdin Serazhutdinovich met his 75th birthday in early February as the Head of the Department of Metal Forming (DMF) of DSEA. Most of his life is connected with the Academy. He devoted almost 45 years to teaching students, developing the university, developing science and engineering.

Aliiev I.S. graduated from the Dagestan Mechanical College in 1964 and began his career in the technological bureau of the forge shop of the Dagdizel plant (Kaspiysk) and at the same time studied at the Leningrad Shipbuilding Institute, which he graduated from 1971.

He got Ph.D. at the Leningrad Polytechnic Institute. His supervisor was a well-known scientist in the field of mechanical engineering Prof. K.N. Bogoyavlensky. After that, Aliiev I.S. worked as a Senior teacher at the Kramatorsk Industrial Institute (now DSEA). This was the beginning of the Kramatorsk period of work and the scientific activity of Professor Aliiev. In 1995, he defended his doctoral dissertation on the topic “Generalization and development of resource-saving extrusion processes”, and in 1997 he received the academic title of Full Professor at the Department of Metal Forming and was elected as the Head of department.

Prof. Aliiev I.S. is a specialist in the field of precise volumetric deformation processes. He founded a scientific school called "Development of resource-saving metal forming processes based on the development of methods and tools for studying the technological modes of plastic deformation". The results of his scientific research were published in 380 scientific and methodological works, including 111 copyright certificates and patents, 1 reference book, 5 scientific monographs, 6 sections of monographs, 6 textbooks for university students.

Since 1979 Prof. Aliiev takes part in the development of scientific projects aimed at meeting the needs of the economy of the USSR and Ukraine. The scientific school headed by him carries out work on the development of new resource-saving technological processes and equipment for shaping precision parts with a complex profile and large-sized blanks for power and heavy engineering. Cold working through the use of high pressures makes it possible to ensure the controlled quality of products, eliminate the waste of metal and the need to finish workpieces by chip removal methods. New technologies for forging critical products provide intensive study of the metal structure due to the development of macroshear deformation. These developments with significant economic effect were introduced at machine-building enterprises (VSMPO, PJSC NKMZ, PJSC EMSS, PJSC Druzhkovsky hardware plant) and instrument-making industry (SMZ Motor Sich, Krasny Luch). He created a new industrial scientific and technical laboratory for the introduction of new technologies at the department. Under the guidance of Prof. Aliiev I.S. four doctoral and thirteen Ph.D dissertations were defended.

From 2003 to 2015 Professor Aliiev I.S. was vice-rector for scientific work and external relations of the DSEA. He organized as the editor-in-chief the publication of three professional collections of scientific papers of the DSEA: Bulletin of the DSEA, Scientific Bulletin of the DSEA (electronic edition) and "OMD – Materials Working by Pressure". He is a member of the editorial board of the magazines "Metalworking" and "Forging and Stamping Production. Materials Working by Pressure". He received two grants for internships in higher educational institutions in Germany through the DFG, which contributed to the expansion of the academy's ties with higher educational institutions in Europe. This made it possible to participate on a competitive basis in the execution in 2009-2017 of three international projects of the European Union through TEMPUS, where he was the coordinator. They contributed to the creation of an innovation center at the academy and equipping the research laboratories of DSEA with modern equipment and computers.

Now Professor Aliiev I.S. continues to head the DMF of DSEA. During the leadership of Prof. Aliiev and with his direct participation, DMF developed several scientific activities in the field of DMF, trained many specialists, candidates and doctors of technical sciences. Graduates who studied in Prof. Aliiev I.S. group are working in the DSEA, at the enterprises of Kramatorsk, in Ukraine and far beyond its borders, including Dagestan.

Prof. Aliiev I.S. was a member of the expert councils of the Ministry of Education and Science of Ukraine in the professional areas "Mechanical Engineering" and "Technologies for the extraction and processing of minerals", worked for two cadences as a member of the expert council on the examination of dissertations of the Ministry of Education and Science of Ukraine in mechanical science and mechanical engineering. He is the chairman of a specialised council at DSEA for awarding doctoral degrees in technical sciences in processes and pressure forming machines.

Professor Aliiev I. S.

At the Day of Metallurgists in Krakow AGH

Prof. Aliiev was multiple winner of the competition "The Best Researcher of the DSEA" and "The Best Inventor of DSEA", was awarded the honorary title "Honored Professor of the DSEA" (2007) with entry into the Book of Honor of DSEA. Many years of successful work of Prof. Aliiev I.S. noted at the all-Ukrainian level. The Ministry of Education and Science of Ukraine awarded him with the badges "Excellence in Education of Ukraine" and "For Scientific Achievements ". By the Decree of the President of Ukraine in 2020, prof. Aliiev I.S. awarded the title "Honored Worker of Science and Technology of Ukraine".

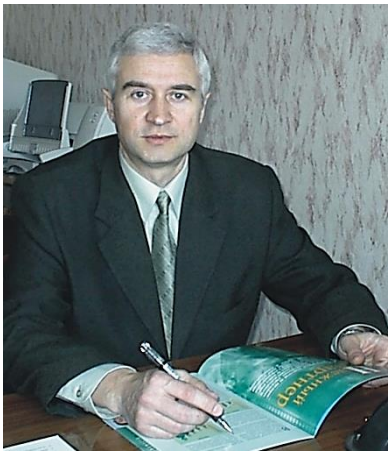
Prof. Aliiev I. S. pays great attention to the dissemination of scientific developments and experience among industry specialists. He organized the International Scientific and Technical Conference "Achievements and problems of technologies and machinery pressure processing development". It has been held in Kramatorsk together with enterprises of the region and universities in the CIS and Europe for more than 25 years.

A few lines about the staff of DMF in first years of work.

Efimov Victor Nikolaevich (1950-2011) – a graduate of the Moscow State Technical University. N.E. Bauman 1974. In 1974-77 he was a design engineer at the Petropavlovsk heavy engineering plant and a senior engineer at the Ural Polytechnic Institute. From 1977 to 1980 he studied full-time postgraduate studies at KII. After defending his dissertation, he worked at the Department of DMF successively as an assistant, senior lecturer and associate professor. In 1987 he defended his doctoral dissertation and was a professor at the department until 1993. Later he worked in the business sector. V.N. Efimov continued the work of Sokolov L.N. on the study and development of the theory of hardening-softening processes of metals and alloys during hot plastic deformation and created a laboratory equipped with experimental facilities for studying the rheological properties of materials. He was one of the initiators of establishing and the head of Industry research laboratory "Optimization of structures and thermal power conditions for the operation of die equipment", which was organized in 1985 on the basis of the department of mechanical engineering. Efimov V.N. author of popular reference books and methodical studies on theory processing pressure and forging .

Efimov V. N.

Laptev A. M.



Tarasov A. F.

Laptev Alexander Mikhailovich received an engineer's degree and a candidate of technical sciences from the Moscow Higher Technical School named after N.E. Bauman. Worked in 1972-75. in SKB hydropulse technology. Siberian Branch of the Academy of Sciences of the USSR (Novosibirsk). From 1978 until recently he worked at DSEA. While working at the department, he develops the direction “Powder materials pressure treatment”, prepares and defends his doctoral dissertation. In 1990 - 2004 and in 2012-2014 was a professor and the head of MTO department, and in 2004 - 2012 - the head of materials science department. He developed the theory of plasticity of powder and porous materials, which he applied to the analysis of hot isostatic pressing of metal powders, as well as methods for modeling hot pressing of powders with direct electrical heating. He developed a technology for the manufacture of high-layered medical implants used in many countries in the world. His research group included Podlesny S.V., Ulyanov A.N., Priymenko S.G., Melnikov A.N., Rudenko N.A., Tkachenko Y.S., Popivnenko L.V., who, after defending their Ph.D. dissertations, worked at DSEA.

Tarasov Alexandr Fedorovich studied at the Mariupol Metallurgical Institute. At the department of DMF, he also went through the research school “postgraduate-doctoral studies” and after defending his doctoral dissertation in 1996, he headed the department of computer information technologies. Tarasov A.F. created a scientific school in the development of new equipment and technologies for combined static-dynamic deformation, actively works in the field of creation and modeling and computer-aided design of new technological processes for mechanical engineering, including bulk nanostructured materials. He is also the head of a scientific direction in the field of

computer modeling of mechanical engineering objects using modern programming technologies based on object-oriented design. A.F. Tarasov is the Deputy Chairman of the Scientific and Technical Council of the Academy and the Deputy Chairman of the Dissertation Council at DSEA.

In subsequent years, at the turn centuries graduates of the department, candidates of technical sciences Savchenko O.K. and Grachev I.A. begin teaching at the department. Kuznetsov N.N., Solodun E.M. and Chuchin. O.V. in 1991. In the following years, the department was also replenished with postgraduate graduates of the DMF: in 2006 Nosakov A.A., Lobanov A.I., Borisov R.S. and Aliieva L.I. were admitted to the department and, subsequently – Abhari P., Zhbankov Ya.G., Shkira A.V., Tahan L.V., Malii K.V. and Kordenko M.Yu.

Successfully worked in the 2000s at the department and doctoral studies, after which doctoral dissertations were defended in a timely manner by doctoral students: Matviychuk V.A., Markov O.E., Zhbankov Ya.G., Aliieva L.I., Abkhari P., Grudkina N.S. Currently, a doctoral graduate Levchenko V.N. prepares for thesis defense.

Graduates of the department after defending their master's and candidate's theses successfully work at the departments of DSEA, at the leading enterprises of the city and in administrative structures of the Donetsk region.

Including the chief specialists of the plants: Lobanov A.N., Zlygorev V.N., Stankov V.Yu., Smitia A.L., Shapovalov A.L., Kikolenko S.N., Shimko A.I. and Shimko V.I.

In the academy departments, work Dean Podlesny S.V., teachers Tahan L.V. and Malii K.V., in administrative structures work Shkira A.V., Gridasov V.M. and Kosilov M.S.

The creation of the material and technical base of the department was facilitated by a large scientific and economic work carried out at the department under the guidance of professors Sokolov L.N., Efimov V.N., Aliiev I.S. and Tarasov A.F. Research and contractual work was carried out in many regions of the Soviet Union. Thus, a wide community was established with the enterprises of Donbass, Leningrad, the Urals and Dagestan, for which a number of works on precision die forging and forging stamping of titanium, aluminum alloys and steels were developed and implemented. On the basis of research, equipment and devices were purchased, new installations were created, which were then used in the educational process. The laboratory has hydraulic presses DV242A, crank press KD1426A, testing machines MS2000; MS500; UMM5; UMZ-10, plastometers and tensometric equipment, which made it possible to carry out laboratory and research work at a high scientific level.

The contribution to the creation of the laboratory base was made by the first head of the laboratories Pogorelov A.I. as well as numerous employees of NIS, who worked at the department in the 80s. The first training master was Ryabenkov Vladimir Alekseevich, whose hands created most of the laboratory installations and visual aids. Since 1992, Aleksey Ivanovich Gvozd has combined the positions of the head of the laboratory and the training master. Great assistance in the implementation of educational and scientific work was provided by the laboratory assistants of the department: Evteeva E.V., Demchenko A.F., Astakhova V.N., Kobylnik L.M., But L.I., Ponomarenko L.A., Medyanik L.V. and Semioshko Ya.A.

Probably the only separate faculty for metal forming in the Soviet Union was created in DSEA. Indeed, at all the departments of this faculty then carried out intensive research on the problems of the development of machines and technologies for MF.

The department pays special attention to cooperation with other organizations. Creative ties are constantly maintained with the National Academy of Sciences of Ukraine, universities and institutes of the CIS countries, Poland, Bulgaria and Germany.

The leading scientists of Ukraine in the field of Metal Forming, professors Evstratov V.A., Ogorodnikov V.A., Titov V.A., Beigelzimer Ya.E., Ray R.I., Dragobetsky V.V., Konovalov Y.V.. became honourable professors of DSEA.

Since the 80s, the Department has been actively conducting International and All-Union, and then All-Ukrainian conferences on problematic issues of the theory and technology of mechanical engineering, including such problems as “Forging large forgings”, “Creation of heavy forging and pressing equipment”, “Local methods of pressure treatment”, “Science-intensive technologies of DMF”, etc. These conferences later became the basis of the traditional and annual international

scientific and technical conference (IRTC), which acquired the name “Achievements and problems of technologies and machinery pressure processing development”. This anniversary year will see the 25th MNTK under this name.

Since 1988, the Department began to publish collections “Improvement of technological processes and pressure treatment equipment”, on the basis of which the interuniversity collection of scientific papers “Obrabotka materialov davleniem (OMD) – Materials Working by Pressure (MWP)”, popular in Ukraine, is published today, approved by the Ministry of Education and Science of Ukraine as a specialized publication.

Since 1998 on the basis of DMF in DSEA, the annual All-Ukrainian student Olympiads in MWP and interuniversity competitions of diploma projects and master's graduation scientific works, which have now become traditional, began to be held.

The best graduates of the department in recent years, masters and engineers improve their qualifications in graduate school: Kordenko M.Yu., Chepelenko A.Yu., Semibratchenko Yu.A. It symbolizes the connection of generations and continuity in science.

Over the many years of graduation from the full-time department, a wonderful tradition has developed of holding student evenings “We are blacksmiths” on the first Friday of December. The original idea of the evening was an initiation into first-year students at a meeting with fifth-year students. Then this day became the Day of the Department, the fifth-year students prepared wall newspapers in the form of funny cartoons, a concert program and a disco. Graduates of previous years came, who warmly recalled their years and were surprised at the surviving wall newspapers.

For many years the department has been cooperating with related departments of other universities, with machine-building plants and research institutes of Ukraine.

The department cooperates with enterprises of the city and the region (NKMZ, SKMZ, Energomashspetsstal, Conditioner, Donmet, DMZ, etc.). A branch of the department has been opened at NKMZ, which serves to strengthen relations between the department and production, as well as to improve the level of training of specialists. It is indicative that Ph.D. Grachev I.A. and Ph.D. Zlygorev V.N. also graduated from the training course and postgraduate studies of the department. Successful cooperation with scientific institutions of the city can be called an invitation to the department in 1991, the chief researcher of NIIPTMASH, Ph.D. Mikhailenko Boris Emelyanovich (1934–2004), who became the leading associate professor and organizer of the educational process.

The department has creative connections with universities, enterprises and firms in CIS, Germany, Poland, and other countries.

TEMPUS-IV projects have helped to strengthen the material base and improve curricula, especially for the preparation of masters. To study the educational and scientific organization in universities in Europe, countries such as Italy, Spain, Germany, Estonia and Sweden.

The main direction of the research activity of the department is the development of resource-saving processes of mechanical engineering on the basis of the creation of new methods for analyzing the patterns of plastic deformation.

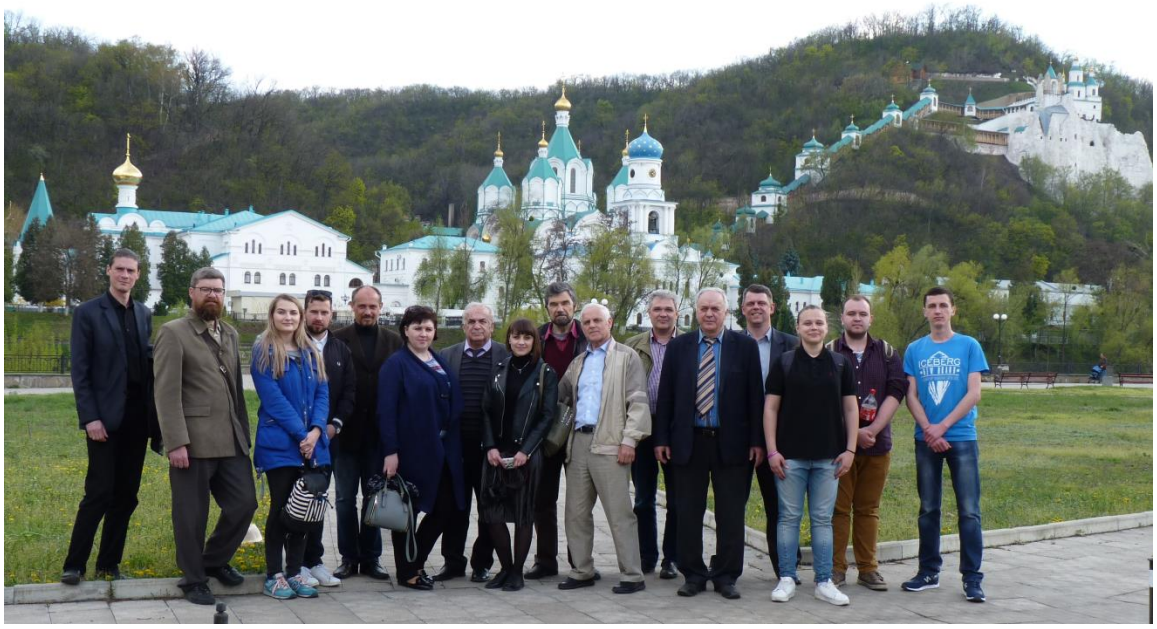
The main innovations of the department include the following developments:

- methods for calculating the technological modes of forging, taking into account the processes of hardening-softening of metals and alloys;
- technological processes for forging large forgings such as plates from ingots of a new type;
- technology of waste recycling of aluminum alloys using granulation and pressing;
- new technological processes of transverse and combined longitudinal-transverse extrusion;
- methods and devices for cold extrusion of complex profiled parts ;
- two-position and multi-position stamps with movable and detachable matrices;
- devices for measuring the forces of plastic contact friction during the stamping process;
- methods of analysis of stress-strain state using materials with shape memory;
- technologies and high-performance tooling for combined multi-pass stamping of sheet hollow and bent parts.

Postgraduate and doctoral studies in the scientific specialty "Processes and Machines of Plastic Working" work at the Department of Mechanical Engineering. On the basis of DMF, a Council

for the defense of doctoral and candidate dissertations was created, which played a decisive role in the training of scientific personnel, both in the academy and in Ukraine. In the beginning, the members of the council, in addition to the scientists of the academy, were well-known scientists, university professors from various cities of the Soviet Union: Zhuravlev A.Z., Klimenko V.M., Beresnev B.I., Cherny Yu.F., Yakovlev S.P., Buravlev Yu. M. and others.

The staff of the Department of Metal Forming in 1987 (above) and in 2012 (below)



Traditional excursion of the participants of the International scientific and technical conference in 2004 (DSEA), 2012 (base "Tishina") and 2018 (Svyatogorsk Lavra)

Meeting of the doctoral council of the first convocation, 1984 year.
Right to left: Prof. Sokolov L.N., prof. Cherny Yu.F., prof. Klimenko V. M.,
prof. Baranov A. A., prof. Zhuravlev A. Z., prof. Zolotukhin N. M., prof. Kaporovich V. G.

After the meeting of the dissertation council: sitting (from left to right) Roganov L.L.,
Ray R.I., Aliiev I.S., Laptev A.M., Sokolov L.N., Doroshko V.I.; standing: Satonin A.V.,
Dobronosov Yu.K., Fedorinov V.A., Beigelzimer Ya.E. (2007 year)

The second graduation of the day division of the Metal Forming Department, 1984

Participants of the traditional Evening of MF specialty, 2011 year

The formation of the scientific school followed the path of strengthening creative ties, recognizing the contribution of Kramatorsk specialists to the development of the scientific field "Metal forming". So, during the work of the special council, a creative community developed with advanced scientific centers and universities, large enterprises, and outstanding scientists.

For 45 years in a specialized council they successfully defended more than 200 candidate and 40 doctoral dissertations, of which 90 candidate and 15 doctoral dissertations - teachers of the DSEA.

Doctoral thesis's were defended by such Ukrainian scientists as Doroshko V.I., Zhadkevich M.L., Spuskanyuk V.Z., Kaplanov V.I., Sivak I.O., Matviychuk V.A., Grushko A.V., Rozov Yu.G. and etc.

Matviychuk Viktor Andrievich graduated from the Vinnitsa Polytechnic Institute (VNTU) in 1977 with a degree in Engineering Technology. In 1984, he graduated ahead of schedule achieving Ph.D. in Leningrad Polytechnic Institute. The academic title of Associate Professor of the Department of Applied Mechanics and Strength of Materials was awarded in 1991. In 2009, he graduated from the targeted doctoral studies at the DSEA and defended his doctoral dissertation "Development of resource-saving processes of local rotational deformation based on the assessment of the deformability of metals" specializing in the Processes and Machines of Plastic Working. The academic title of professor was awarded in 2015. After that, he worked as a senior lecturer and associate professor at VNTU, and head of the science and international relations department of the Vinnitsa Trade and Economic Institute of KNTEU. Since May 2011, he worked at the Vinnitsa National Agrarian University as Deputy Director of the Educational and Scientific Institute of Agrarian Economics of VNAU for scientific work and head of the Department of Systems, Technologies and Automation in the Agro-Industrial Complex. From March 2019 to August 2021, he was the dean of the Faculty of Engineering and Technology of VNAU. Viktor Andrievich is the author of more than 220 scientific and educational works, 3 monographs, 1 textbook, 3 manuals and 21 patents.

Biographies of Doctors of Sciences Markov O.E., Zhbankov Y.G., Aliieva L.I. are identical in the sense that after graduating from the graduate and postgraduate studies, after some time, they entered the doctoral program at the Metal Forming Department named after prof. L.N. Sokolov of DSEA and successfully defended their doctoral dissertations.

Markov Oleg Evgenievich received a specialist diploma in 1998, a master's degree in 2000 and a candidate of science diploma in 2004 at the Metal Forming Department. In 2008, O.E. Markov enrolled in doctoral studies and continued research on the problems of developing the technology of forging large ingots. He developed the theory of Prof. Sokolov L.N. on the development of a rheological model of stress relaxation processes during hot deformation of metals, which made it possible to create refined finite element models of forging processes. In addition, new scientifically based concepts for obtaining massive forging ingots and developing resource-saving technological processes for large forgings for critical purposes were developed. After defending his doctoral dissertation in 2012 and receiving the title of professor, he continued to work at the Metal Forming Department. In 2015, he was selected by competition for the position of vice-head of the department "Machines and technologies for metal forming", being promoted to the head of Department of Automation of Production Processes in 2021. O.E. Markov and has more than 250 scientific papers, including 6 monographs and 70 patents.

Aliieva Leila Igramotdinovna graduated from the DSEA Master's program in the specialty "Metal Forming" in 2003, and postgraduate studies with the defense of a dissertation - in 2006. Doctor of Technical Sciences since 2018. She was awarded the academic title of Associate Professor of the Department of Metal Forming in 2012, and Professor in the Department “Computerized design and modeling of processes and machines” in 2020. She is the responsible executor and co-executor of 7 research topics. Aliieva L.I. developed new methods of combined transverse-longitudinal extrusion of precision parts and methods for modeling processes using kinematic modules, as well as methods for predicting deformability, taking into account the influence of volumetric stress state. She has published 3 monographs, 120 articles and 48 patents.

Zhbankov Yaroslav Gennadievich received a master's degree in 2007 at the Department of Metal Forming, and a Ph.D. in 2010. In 2015 he entered postgraduate studies and researched problems of modelling technologies of large forging and prediction of its quality. Y. G. Zhbankov studied the processes of evaluating the deformability of metals and the microstructure of forgings during forging, the effect of macroshears on the quality of large forgings, and the introduction of combined stamping techniques in the manufacture of large forgings. He has published 3 monographs and manuals, 100 articles and 38 patents.

Aliieva L.I. and Zhbankov Y.G. were repeated winners of the intra-university competition "The Best Names of the DSEA" and in 2016 became the Laureates of the President of Ukraine Prize for Young Scientists. They won the competitions of the Ministry for youth research projects 2 times, and also participated in the projects of the European Union TEMPUS-IV: UNI4INNO and ECOTESY.

Abhari Payman received a master's degree in mechanical engineering in Tehran, studied in postgraduate and doctoral studies at the Metal Forming Department in 2006-2020. After successfully defending his dissertations, he worked at the Metal Forming Department as an assistant professor and is now a professor at the department. He devoted his work to computer modeling of the processes of transverse and combined extrusion of complex profiled parts under the conditions of control of external force and kinematic effects on the workpiece. He has 120 published scientific papers and textbooks, including publications indexed in international scientometric databases (Scopus, Web of Science , etc.). Abhari P. was the executor of the international project TEMPUS in the period 2013-2016. He is deputy head of Metal Forming Department.

Hrudkina Natalya Sergeevna graduated from the Slavyansk State Pedagogical Institute and received a master's degree in mathematics. Since 2004, she joined the scientific school of OMD DSEA, where she focused on mastering the basics of the mechanics of Metal Forming processes and the development of theoretical aspects of modeling the processes of precise forging. The result of research work in this direction is the development of resource-saving pressure treatment processes based on the creation of new technological methods and methods for analyzing the patterns of plastic deformation, which became the basis of a monograph, textbooks, articles in international scientific journals and a doctoral dissertation successfully defended in 2021. N.S. Grudkina continues to work as an associate professor of the Department of Mathematical Modeling and as a responsible executor of state budget research robots of the DSEA.

Matviychuk V. A.

Markov O. E.

Zhbankov Y. G.

Aliieva L. I.

Abhari Payman

Hrudkina N. S.

One of the leading departments of the faculty was the department "Machines and technologies of Metal Forming", where in different years the heads were professors Zolotukhin N.M., Kaporovich V.G., Laptev A.M., Roganov L.L. and Markov O.E. The department in different years, as now, united with our Metal Forming Department.

Roganov Lev Leonidovich, Dr. Sc., Professor. He graduated from KII in 1963. He worked at NKMZ successively as a technician, design engineer of the 1st category and as a team leader. Since 1973 At KII, he went from senior lecturer to vice-rector for academic affairs and Head of the Department. Scientific interests of L.L. Roganov were about the development of new types of equipment and technological processes for high-speed metal forming. He founded and directed a scientific school for the research and development of new high-speed technologies and machines with a combined (static-dynamic) effect on the workpieces. He created specialized press hammers for the implementation of many technologies in the field of powder materials stamping, sheet stamping with elastic media and hot forging. He opened promising directions for the development of technologies and equipment for separating long products into cut-to-length blanks. His students are associate professors Karnaukh S.G. and Chosta N.V. successfully continue this research and development.

Mikhailenko B. E.

Roganov L. L.

Satonin A. V.

It is also worth to mention the department of automated machines and units (AMM), where the department for many years was headed by its founder, D.Sc., Prof. Potapkin V.F., and later - professors Fedorinov V.A., Satonin A.V. and Gribkov E.P. Potapkin Victor Fedorovich (1934-2005) and Satonin Alexander Vladimirovich (1953-2013) headed the main direction of the scientific work of the department "Research and implementation of rolling processes", in particular, the deformation process between the fixed and driven rolls. The subject of special concern of V.F. Potapkin was the experimental base of the department, which is currently the best among related departments of Ukrainian universities. Taking into the account the significant contribution to science, it is crucial to note the pedagogical and organizational activities of the staff of the department. V.F. Potapkin and Fedorinov V.A. were vice-rectors and rectors of the DSEA, and Satonin A.V. - Chairman of the dissertation council. Docents Dobronosov Yu.K. and Kulik A.N. are scientific secretaries of the special council and the academic council of the academy, respectively.

Currently, at the Metal Forming Department named after Sokolov L.N. constant work is carried out to improve the educational process, update training courses, modernize and equip laboratories and specialized classrooms, develop and implement software in the educational process using modern technologies. The presence of branches expanded the material and technical base of the department and significantly increased the possibility of successful work of graduates in the conditions of the conversion of defense enterprises.

During this difficult historical period, the department maintains close creative ties with factories, research institutes, related universities and departments, and does not lose hope for the possibility of continuing creative scientific work and fruitful activities in training students and graduate students in the field of metal forming.

REFERENCES

1. Lev Nikolaevich Sokolov. Time. Life. Events / under total ed. Prof. I.S. Aliiev. Kramatorsk: DSEA. 2012. 180 p. ISBN 978-966-379-617-8 *(in Russian).*

2. Aliiev I. S. Sokolov Lev Nikolaevich. Teacher. Scientist. Leader (to the 90th birthday). *Materials Working by Pressure*. Kramatorsk : DSEA. 2012. 1 (30), pp. 3–7 *(in Russian).*

3. Aliieva L.I., Zhbankov Y.G. 60 years of Metal Forming by DSEA. *Materials Working by Pressure*. Kramatorsk: DSEA. 2017. 1 (44), pp. 3–17 *(in Russian).*

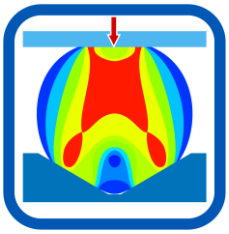
4. Aliiev I.S. is 70 years old. *KSHP. OMD*. 2017. 2, pp. 47-48 *(in Russian).*

5. Newspaper of the DSEA "*Academy*". No. 2 (396) dated February 4, 2022 *(in Russian).*

Aliieva L. I.
Tahan L. V.

ЗМІСТ

Sokolov Lev Nikolaevich (for 100th anniversary) 3



РОЗДІЛ І
МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ОБРОБКИ ТИСКОМ

Aliieva L. I., Levchenko V. M., Aliiev I. S., Kartamyshev D. O.
The development of triangular kinematic module to calculate the deformation pressure in the extrusion processes 10

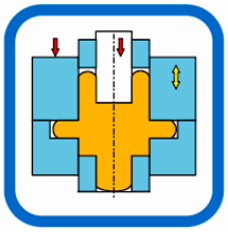
Бейгельзимер Э. Е., Бейгельзимер Я. Е.
Простой способ оценки производной эмпирической функции по ее значениям в неравноотстоящих точках 21

Грушко О. В., Кириця І. Ю.
Критерії деформовності з врахуванням властивостей матеріалу в параметрі напруженого стану 30

Грудкіна Н. С., Левченко В. М., Абхарі П., Коцюбівська К. І., Малій Х. В.
Особливості проектування процесів точного об'ємного штампування видавлюванням на основі енергетичних моделей розрахунку 38

Калюжний В. Л., Левченко В. М., Ярмоленко О. С., Таган Л. В.
Вплив швидкості деформування на гаряче зворотне видавлювання осесиметричного порожнистого виробу 46

Тітов В. А., Назарук Т. О.
Розробка методу розрахунку кривих деформування волокнистих композиційних матеріалів з металевою матрицею 55



РОЗДІЛ II
ПРОЦЕСИ ОБРОБКИ ТИСКОМ У МАШИНОБУДУВАННІ

Марков О. Є., Хващинський А. С., Мусорін А. В., Лисенко А. А., Молодецький В. В.
Дослідження нового способу кування великих злитків на основі осадження заготовок з уступами 61

Гожій С. П., Мироненко В. А.
Перспективний напрям локального формоутворення – суміщене штампування обкочуванням 71

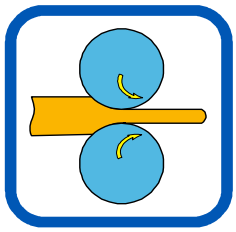
Медведєв М. І., Бобух О. С., Кузьміна О. М., Самсоненко А. А.
Удосконалення технології кування трубних заготовок з титанових сплавів в умовах ТОВ "Дніпропрес Сталь" 80

Михалевич В. М., Матвійчук В. А., Колісник М. А.
Оцінка деформовності матеріалу заготовок при прямому видавлюванні методом штампування обкочуванням 87

Тараненко М. Є., Нарижний О. Г.
Керування параметрами ЕГ-навантаження для штампування листових деталей з мінімальним жолобленням 98

Орлюк М. В., Піманов В. В.
Використання програмного комплексу DEFORM для оптимізації операцій листового формування 110

Драгобецький В. В., Савєлов Д. В., Молоштан Д. В.
Резонансні явища в процесах вібраційного ущільнення порошкових заготовок 117



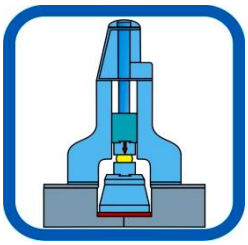
РОЗДІЛ III
ПРОЦЕСИ ОБРОБКИ ТИСКОМ У МЕТАЛУРГІЇ

Карнаух С. Г.
Підвищення якості заготовок, отриманих способом ломки згином при статико-динамічному навантаженні на прес-молоті 123

Кухар В. В., Горностай В. М., Курпе О. Г.
Енергоспоживання та витрати емульсолу при холодній прокатці смуг з вуглецевої сталі на безперервному 4-х клітьовому стані 1680 134

Kulik T. A.
Investigation of the temperature factor on the formation of a strip surface micro-relief during warm rolling 141

Корева В. О.
Холодне прокатування алюмінієвого сплаву системи AL-MG..... 147



РОЗДІЛ IV
ОБЛАДНАННЯ ТА УСТАТКУВАННЯ ОБРОБКИ ТИСКОМ

Алієв І. С., Марков О. Є., Карнаух С. Г.
Розробка та дослідження конструкцій штампів для розділення профілів складної конфігурації на мірні заготовки 154

Гожій С. П., Мироненко В. А.
Передумови створення енергоефективних технологій і обладнання орбітального штампування обкочуванням 166

Тарасов О. Ф., Касьянюк О. С., Грибков Е. П., Бабаш А. В., Коваленко А. К.
Проектування системи керування експериментальною установкою для процесу кручення під високим тиском порожнистих заготовок 177

Карнаух С. Г., Чоста Н. В.
Розробка допоміжних пристроїв до штампів для відрізки сортового прокату зсувом з диференційним затиском..... 188

Гринь О. Г., Трембач І. О.
Багатокритеріальний аналіз наплавочних матеріалів для відновлення і зміцнення деталей..... 196

Сухов В. В., Кабанячий В. В.
Оцінка ресурсу деталей на стадії проектування та аналіз ефективності технологічних процесів заготівельно-штампувального виробництва 204

Алтухов О. В., Тарасов О. Ф.
Розробка програмних компонентів для моделювання інтенсивного пластичного деформування на основі параметричної моделі оснащення 214

Anniversary of the Department of Metal Forming DSEA 224

ВИМОГИ
ДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТЕЙ ДЛЯ ПУБЛІКАЦІЇ У ЗБІРНИКУ
«ОБРОБКА МАТЕРІАЛІВ ТИСКОМ»

До публікації у збірнику приймаються статті обсягом **від 6 до 12 повних** сторінок. Усі матеріали надсилаються в електронному вигляді на адресу: igramaliiev@gmail.com, herald@dgma.donetsk.ua з позначкою теми <прізвище автора, місто> (Ivanov Kiev).

До статті додаються:

– акти експертизи (для авторів з України);

– **рецензія**, підписана рецензентом звичайним або цифровим електронним підписом, виписка із засідання кафедри або відділу.

Стаття має відповідати тематиці збірника та сучасному стану науки та техніки, містити новий науковий результат. **Структура статті** повинна містити такі необхідні елементи:

• **анотації (обсягом 1800–2300 знаків, 17–18 рядків розміром 10 пт)**, українською, англійською та російською мовами (анотація має відображати актуальність, мету, завдання, методи, висновки, перспективи даного дослідження, ключові моменти, результати та новизну роботи);

• **ключові слова (5–10 слів)** українською, англійською та російською мовами;

• **постановка проблеми**, завдання у загальному вигляді, її актуальність та зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями;

• **аналіз останніх досліджень та публікацій** *(не менше 3-х статей, що вийшли за останні 10 років)*, у яких розпочато вирішення даної проблеми та на які спирається автор;

• виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, яким присвячується ця стаття;

• **формулювання мети статті** та постановка приватних завдань, які вирішені у статті (*З нового рядка – «Метою роботи є .....»*);

• **викладення основного матеріалу дослідження** з обґрунтуванням отриманих наукових результатів;

• **висновки** з отриманих наукових результатів з конкретними рекомендаціями та перспективи подальших робіт у даному напрямку (із заголовком ВИСНОВКИ, розташованим по центру рядка).

Текст розмістити на білому папері формату А4 (210 × 297 мм) із полями 20 мм з усіх боків. Листи не нумерувати. Орієнтація сторінки розміщення тексту – книжкова. Для розміщення табличних даних, графіків, схем, малюнків за необхідності допускається альбомна орієнтація сторінки. **Текст статті** оформити у редакторі Word 7.0-10.0 шрифтом Times New Roman Cyr (звичайний) розміром 12 пунктів; між рядками – одинарний інтервал; абзацний відступ – 1,25 см; вирівнювати по ширині сторінки із переносами.

Текст анотацій оформити шрифтом Times New Roman Cyr (курсив) розміром 10 пт; між рядками – одинарний інтервал. У тексті статті не допускається вирівнювання пробілами.

Ілюстративний матеріал монтується у тексті. Встановлюється *обтікання малюнків у тексті*. За потреби допускається використання кольорових малюнків. Всі рисунки, особливо скановані (*роздільна здатність – не менше 200 dpi*), повинні бути чіткими, без стиснення. Рисунок у статті повинен бути розміщений після посилання на нього у тексті. Кожен рисунок забезпечується підписом, що містить номер малюнка та його назву. Підпис починається з нового рядка (відступ 1,25 см), вирівнювання по ширині.

Таблиці виконують відповідно до вимог стандарту та розміщуються у тексті статті або на окремих сторінках у тій послідовності, в якій вони наводяться у статті. Обов'язково у тексті мають бути посилання на таблиці. Графічний матеріал та таблиці не повинні виходити за поля сторінки. Сумарний обсяг малюнків та таблиць **не повинен перевищувати 50 %** обсягу статті.

Формули набираються в редакторі Microsoft Equation з параметрами: стандартний - 12 пунктів; великий індекс - 10 пунктів; дрібний індекс – 8 пунктів; великий символ – 14 пунктів; дрібний символ – 8 пунктів, вирівнювання по центру сторінки без абзацного відступу. Нумерацію формул виконують з вирівнюванням номера по правому полю.

Структура оформлення статті: на першій сторінці статті у першому рядку з абзацу набирається УДК. У наступному рядку праворуч з абзацу – прізвища та ініціали авторів. Нижче з абзацу шрифтом Times New Roman Cyr (простий) розміром 12 пунктів ВЕЛИКИМИ ЛІТЕРАМИ – назва статті. **Анотація** – з абзацу мовою статті, обсягом 1800–2300 знаків (17–20 рядків). Після анотації – **ключові слова.**

Анотації та ключові слова двома іншими мовами (обсягом 1800–2300 знаків кожного) наводяться після розділу REFERENCES. Текст анотацій та ключові слова (укр., англ., рус.) оформити шрифтом *Times New Roman Cyr (курсив)* розміром 10 пунктів; між рядками – одинарний інтервал.

Далі розмістити **основний текст статті**, що закінчується розділом **ВИСНОВКИ**.

Розділ **ВИСНОВКИ** починається з нового рядка, озаглавлюється словом ВИСНОВКИ (шрифт Times New Roman (звичайний)), розмір 12 пунктів, великі літери, вирівнювання по центру). Вирівнювання основного тексту висновків по ширині сторінки.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ, набраний шрифтом Times New Roman Cyr (звичайний) розміром 12 пт великими літерами, розмістити по центру сторінки через рядок від ВИСНОВКІВ. Список літератури оформити згідно з **ДСТУ 8302:2015** шрифтом Times New Roman розміром 10 пт; між рядками – одинарний інтервал. **REFERENCES** оформлюється після СПИСКУ ЛІТЕРАТУРИ: латиницею транслітерація прізвищ авторів; назви статей, журналів, конференцій, власні імена, видавництва, місце видання перекласти на англійську мову. Після REFERENCES наводяться анотації та ключові слова двома іншими мовами (обсягом 1800–2300 знаків кожна).

Відомості про авторів вказуються наприкінці всього поданого матеріалу українською, англійською та російською мовами: повністю вказати ПІБ, вчений ступінь та вчене звання, місце роботи, посада, електронну адресу кожного автора (e-mail) для листування, ORCID.

Як приклад з оформлення можна розглядати статті цієї збірки.

Наукове видання

ОБРОБКА МАТЕРІАЛІВ ТИСКОМ

Збірник наукових праць

MATERIALS WORKING BY PRESSURE

Collection of science papers

Технічне редагування, коректування, макетування:
Катюха О. Л.

Формат 60 × 90/8.
Ум. друк. арк. 27,9.
Тираж 100 прим.

Адреса редакції:
84313, м. Краматорськ, вул. Академічна, 72, каб. 1322,
тел.: (0626) 41-69-42, 41-67-88,
e-mail: herald@dgma.donetsk.ua, elenakel12@gmail.com

Видавець і виготівник
Донбаська державна машинобудівна академія
84313, м. Краматорськ, вул. Академічна, 72
Свідоцтво про внесення до Державного реєстру
серія ДК № 1633 від 24.12.03