

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

ВІСНИК
НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
«ХПІ»

*Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки
матеріалів у машинобудуванні та металургії*

№ 35 (1257) 2017

Збірник наукових праць

Видання засновано у 1961 році

Харків
НТУ «ХПІ» 2017

Вісник Національного технічного університету «ХПІ»

Збірник наукових праць. Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2017. – № 35 (1257) – 91 с.

Державне видання

Свідоцтво Держкомітету з інформаційної політики України

КВ No 5256 від 2 липня 2001 року

Збірник виходить українською та російською мовами.

Вісник Національного технічного університету «ХПІ» внесено до «Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук», затвердженого рішенням Атестаційної колегії МОН України щодо діяльності спеціалізованих вчених рад, від 15 грудня 2015 р. Наказ № 1328 (додаток 8) від 21.12.2015 р.

Координаційна рада:

Л. Л. Товажнянський, д-р техн. наук, чл.-кор. НАНУ (**голова**)

К. О. Горбунов, канд. техн. наук, доц. (**секретар**)

А. П. Марченко, д-р техн. наук, проф.; Є. І. Сокол, д-р техн. наук, чл. -кор. НАНУ, д-р техн. наук, проф.; Є. Є. Александров, д-р техн. наук, проф.; А. В. Бойко, д-р техн. наук, проф.; Ф. Ф. Гладкий, д-р техн. наук, проф.; М. Д. Годлевський, д-р техн. наук, проф.; А. І. Грабченко, д-р техн. наук, проф.; В. Г. Данько, д-р техн. наук, проф.; В. Д. Дмитриєнко, д-р техн. наук, проф.; І. Ф. Домнін, д-р техн. наук, проф.; В. В. Єпіфанов, канд. техн. наук, проф.; Ю. І. Зайцев, канд. техн. наук, проф.; П. О. Качанов, д-р техн. наук, проф.; В. Б. Клепиков, д-р техн. наук, проф.; С. І. Кондрашов, д-р техн. наук, проф.; В. М. Кошельник, д-р техн. наук, проф.; В. І. Кравченко, д-р техн. наук, проф.; Г. В. Лісачук, д-р техн. наук, проф.; О. К. Морачковський, д-р техн. наук, проф.; В. І. Николаєнко, канд. іст. наук, проф.; П. Г. Перерва, д-р екон. наук, проф.; В. А. Пуляєв, д-р техн. наук, проф.; М. І. Рищенко, д-р техн. наук, проф.; В. Б. Самородов, д-р техн. наук, проф.; Г. М. Сучков, д-р техн. наук, проф.; М. А. Ткачук, д-р техн. наук, проф.

Редакційна колегія серії:

Відповідальний редактор: А. П. Марченко, д-р техн. наук, проф.

Заступник відповідального редактора: Ю. О. Плєснецов, канд. техн. наук, ст.н.с.

Відповідальний секретар: В. М. Левченко, канд. тех. наук, доц.

Члени редколегії: І. С. Алієв, д-р техн. наук, проф., Г. А. Баглюк, д-р техн. наук, проф.; Бар Рюдигер, д-р техн. наук, проф.; В. В. Драгобецький, д-р техн. наук, проф.; С. В. Єршов, д-р техн. наук, проф.; В. Л. Каложний, д-р техн. наук, проф.; М. Є. Тараненко, д-р техн. наук, проф.; Є. М. Смирнов, д-р техн. наук, проф.; Г. М. Сучков, д-р техн. наук, проф.; В. А. Тітов, д-р техн. наук, проф.; О. І. Тришевський, д-р техн. наук, проф.; С. В. Федоров, д-р техн. наук, проф.; Є. А. Фролов, д-р техн. наук, проф.; В. Хомберг, д-р техн. наук, проф.; В. В. Чигиринський, д-р техн. наук, проф.

Рекомендовано до друку вченою радою НТУ «ХПІ»

Протокол № 8 від 27 жовтня 2017р.

© Національний технічний університет «ХПІ», 2017

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE
NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY
«KHARKIV POLYTECHNIC INSTITUTE»

**BULLETIN
OF
THE NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY
«KHARKIV POLYTECHNIC INSTITUTE»**

*Series: Innovative technologies and equipment handling
materials in mechanical engineering and metallurgy*

No 35 (1257) 2017

Collected Works

The publication was founded in 1961

Kharkiv
NTU "KhPI" 2017

Collected Works. Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2017. – No 35 (1257) – 91 p.

State Edition

Certificate of State Committee of Ukraine for Information Policy

KB No 5256 from July 2, 2001

The collection is published in Ukrainian and Russian.

The Bulletin of the National Technical University «KPI» is put on "The List of Scientific Professional Editions of Ukraine that publish the data of theses for the degree of candidate of sciences and the degree of doctor» approved by the Decision of the Certifying Board of the Ministry of Education and Science of Ukraine as to the Activities of Special Academic Councils of December 2015. Order No1328 (Supplement No8) of 21.12.2015.

Coordinating Council:

L.L. Tovazhnyansky, Dr. of Sciences, correspondent-member of National Academy of Sciences (head)

K.A. Gorbunov, PhD. (secretary)

A.P. Marchenko, Dr. of Sciences, professor; E.I. Sokol, Dr. of Sciences, correspondent-member of National Academy of Sciences, Dr. of Sciences, professor; E.E. Aleksandrov, Dr. of Sciences, professor; A. Boyko, Dr. of Sciences, professor; F.F. Gladkiy, Dr. of Sciences, professor; M.D. Godlevskiy, Dr. of Sciences, professor; A.I. Grabchenko, Dr. of Sciences, professor; V.G. Danko, Dr. of Sciences, professor; V.D. Dmytryyenko, Dr. of Sciences, professor; J.F. Domnina, Dr. of Sciences, professor; V. Epifanov, PhD., professor; Y.I. Zaitsev, PhD., professor; P. Kachanov, Dr. of Sciences, professor; V.B. Klepikov, Dr. of Sciences, professor; S. Kondrashov, Dr. of Sciences, professor; V.M. Koshelnyk, Dr. of Sciences, professor; V. Kravchenko, Dr. of Sciences, professor; G.V. Lisachuk, Dr. of Sciences, professor; O.K. Morachkovskiy, Dr. of Sciences, professor; V. Nikolaenko, PhD., professor; P.G. Pererva, Dr. of Sciences, professor; V.A. Pulyaev, Dr. of Sciences, professor; M.I. Rischenko, Dr. of Sciences, professor; V.B. Samorodov, Dr. of Sciences, professor; G.M. Suchkov, Dr. of Sciences, professor; M.A. Tkachuk, Dr. of Sciences, professor.

The editorial board of the series:

Editor: A.P. Marchenko, Dr. of Sciences, professor.

Deputy managing editor: Y.O. Plesnetsov, PhD., senior scientist

Secretary: V.N. Levchenko, PhD., Sciences Assoc.

Members of the Editorial Board: I.S. Aliyev, Dr. of Sciences, professor; G.A. Bahlyuk, Dr. of Sciences, professor; Bar Ryudyher, Dr. of Sciences, professor; V. V. Drahobetsky, Dr. of Sciences, professor; S.V. Ershov, Dr. of Sciences, professor; V. L. Kalyuzhny, Dr. of Sciences, professor; M.E. Taranenko, Dr. of Sciences, professor; E.M. Smirnov, Dr. of Sciences, professor; G.M. Suchkov, Dr. of Sciences, professor; V.A. Titov, Dr. of Sciences, professor; O.I. Trishevsky, Dr. of Sciences, professor; S.V. Fedorov, Dr. of Sciences, professor; E.A. Frolov, Dr. of Sciences, professor; V. Homberh, Dr. of Sciences, professor; V. V. Chigirinsky, Dr. of Sciences professor.

Recommended for publication by the Academic Council of NTU "KhPI"

Protocol No 8 from October 27, 2017

*Л.В. АВТОНОМОВА, Е.Д. ГРОЗЕНОК, А.В. СТЕПУК, С.Ю. ПОГОРЕЛОВ***ЧИСЛЕННОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНТАКТНЫХ УСИЛИЙ ПРИ ГОРЯЧЕЙ РАСКАТКЕ
ЗАГОТОВКИ ПОДШИПНИКОВОГО КОЛЬЦА**

Методом конечного элемента проведено численное моделирование процесса горячей раскатки заготовки подшипникового кольца. Для определения параметров напряженно-деформированного состояния была решена нестационарная контактная краевая термовязкопластическая задача при неравномерном и постоянном распределении начального поля температур в заготовке. Наблюдается увеличение усилия раскатки неравномерно нагретой заготовки, полученной при штамповке способом однопроходной и двухпроходной формовки. Незначительное повышение энергозатрат на технологическую операцию раскатки позволяет получить подшипниковые кольца с улучшенными прочностными характеристиками.

Ключевые слова: кольцо подшипника, горячая раскатка, моделирование, термовязкопластичность, метод конечных элементов.

В роботі проведено методом скінченного елемента чисельне моделювання процесу гарячого розкочування підшипникового кільця. Для визначення параметрів напружено-деформованого стану була вирішена нестационарна контактна крайова термов'язкопластична задача при нерівномірному розподілі початкового поля температур заготовки. Спостерігається збільшення зусилля розкочування нерівномірно нагрітої заготовки, отриманої при штампуванні способом однопрохідного і двопрхідного формування. Незначне підвищення енерговитрат на технологічну операцію розкочування дозволяє отримати підшипникові кільця з поліпшеними характеристиками міцності.

Ключові слова: кільце підшипника, гаряча раскатка, моделювання, термов'язкопластичність, метод скінчених елементів.

The simulation design of hot rolling process out bearing ring is conducted applying the method of finite elements. A mathematical model to process the high-speed deformation of the ring cylindrical workpiece is presented. To determine parameters of the bearing ring stress-deformed state, during the deforming, the non-stationary contact viscous plastic boundary value problem under non-uniform and instant temperature fields distribution in the workpiece was numeral solved applying the method of finite element based on incremental Lagrange-Euler independent approach. Values of contact forces (pressures) between a roller and a workpiece were defined. The reviewed analysis of overall contact forces variation demonstrated the rolling-out forces increase for initially non-uniformly heated workpiece. The contact forces values are also defined in the hot rolling ring out for rational distribution of fibred structure within the workpiece material after the two-step molding with the more irregular heating of the workpiece. The small growth in energy consumption happening because of the increasing forces during the rolling-out operations leads to producing the bearing rings material having the rational distribution of fibred structures. Such distribution allows to achieve the higher durability of the bearing rings, and results in their robustness increase during the whole working cycle.

Keywords: bearing ring, hot ring rolling, modeling, thermal visco-plasticity, finite element method.

Введение. Процесс изготовления кольца подшипника предполагает последовательное выполнение ряда технологических операций (нагрев, штамповка, раскатка), при проектировании которых необходимо задать входные параметры с учетом технологической наследственности заготовки. В следствии высоких температур и больших пластических деформаций только предварительное моделирование позволяет прогнозировать формоизменение заготовки и структурные изменения ее материала на каждом этапе. Выбор оптимальных параметров заключительной операции – раскатки кольца может обеспечить долговечность подшипника при эксплуатации.

Анализ последних исследований и литературы. Создание мощных программных комплексов позволило проводить численное моделирование методом конечных элементов процесса раскатки подшипникового кольца [1–6]. Исследованию термовязкопластического деформирования кольца при раскатке посвящено много работ, в которых представлены результаты анализа влияния на напряженно– деформированное состояние кольца различных факторов, таких как зависимости термомеханических свойств материала от высоких уровней температуры и скоростей деформаций [2], распределения начальной

температуры предварительного нагрева, вида трения [3] и т.д. В статье [4] рассмотрен процесс расширения внешнего диаметра кольца с учетом реакции материала кольца на режим обработки. Исследованию распределения температурного поля при горячей раскатки колец была посвящена работа [5]. Установлено, что с уменьшением начальной температуры кольцевой заготовки и увеличением скорости подачи холостого вала уменьшается неравномерность распределения температуры кольцевой заготовки. Исследованию микро– и макроструктуры материала в процессе раскатки подшипникового кольца посвящена работа [6]. В статье анализируется изменение волокнистой структуры материала кольца подшипника в процессе горячей раскатки. Представлены картины распределения линий Лагранжа в кольце после раскатки для заготовок, полученных способом однопроходной и двухпроходной формовки при предварительной операции штамповки.

Целью данной статьи является исследование напряженно-деформированного состояния кольца подшипника и контактных усилий, возникающих в процессе горячей раскатки с учетом неравномерного начального нагрева заготовки и распределения волокнистой структуры ее материала.

Постановка задачі. При моделюванні деформування заготовки в процесі раскатки подшипникового кільця прийнята математическая модель, которая включает уравнения закона сохранения массы, энергии и момента количества движения, условия неразрывности, нелинейные физические уравнения, нестационарное уравнение теплопроводности, условия контакта.

Система уравнений для решения задачи термовязкопластичности представлена в виде [2]:

$$\dot{\rho} = -\rho \frac{\partial v_i}{\partial x_i}, \quad (1)$$

$$\rho \dot{e} = \sigma_{ij} \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \rho r - \frac{\partial q_i}{\partial x_i}, \quad (2)$$

$$\rho \dot{v}_i = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho f_i^B, \quad (3)$$

где $\rho, \dot{\rho}$ – плотность и скорость изменения плотности, $v_i, \dot{v}_i$ – скорости и ускорения материальной точки, $e = e(\rho, \theta)$ – удельная внутренняя энергия, σ_{ij} – тензор напряжений, r – внутренние распределенные источники тепла, q_i – вектор теплового потока, f_i^B – компоненты вектора объемных сил, θ – температура.

Физические уравнения имеют вид:

$$\sigma_{ij}^T = C_{ijkl} D_{kl}, \quad (4)$$

где σ_{ij}^T – тензор скоростей напряжений, C_{ijkl} – тензор физической связи напряжения-деформации, D_{kl} – тензор скоростей деформаций:

$$D_{kl} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_k}{\partial x_l} + \frac{\partial v_l}{\partial x_k} \right) \quad (k, l = 1, 2, 3) \quad (5)$$

Уравнение виртуальной работы δW в области пластических деформаций в момент времени $t + \Delta t$ может быть записано в виде:

$$\int_V \sigma_{ij} \delta e_{ij} dV - \int_V \rho a_i \delta u_i dV - \int_V \rho (v_j - v_j^g) \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \delta u_i dV = \delta W$$

где δu_i – вариация приращения виртуальных перемещений, V – объем, e_{ij} – тензор деформаций,

$$\delta W = \int_V \rho f_i^B \delta u_i dV + \int_S f_i^S \delta u_i dS, \quad (7)$$

где f_i^S – компоненты вектора сил на поверхности S .

Уравнение ассоциированного закона теории течения в скоростной форме:

$$D_{ij}^p = \dot{\lambda} \frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}}, \quad (8)$$

где $\dot{\lambda}$ – параметр пластичности, F – пластический потенциал в виде (пластическое состояние соответствует $F(\sigma_{ij}, \sigma_y) = 0$):

$$F(\sigma_{ij}, \sigma_y) = f(\sigma_{ij}) - \sigma_y, \quad (9)$$

где $f(\sigma_{ij})$ – функция пластичности, σ_y – функциональная зависимость для текущего предела текучести от эквивалентной деформации, эквивалентной скорости деформации и температуры, представляемая в виде определяющего соотношения:

$$\sigma_y = \sigma_y(\bar{\varepsilon}_p, \dot{\bar{\varepsilon}}_p, \theta), \quad (10)$$

где $\bar{\varepsilon}_p$ – эквивалентная пластическая деформация, $\dot{\bar{\varepsilon}}_p$ – скорость эквивалентной пластической деформации.

Граничные условия на контактной поверхности принимаются:

$$|\tau_t| > \mu_s |p_n|. \quad (11)$$

где p_n и τ_t – контактное давление и касательное усилие в точке контакта, μ_s – коэффициент трения.

Уравнение нестационарной теплопроводности можно представить в виде:

$$\rho c \dot{\theta} + \rho c (v_i - v_i^g) \frac{\partial \theta}{\partial x_i} - \frac{\partial (\lambda^* \frac{\partial \theta}{\partial x_i})}{\partial x_i} = \dot{q}_v \quad (12)$$

где c – теплоемкость, λ^* – коэффициент теплопроводности, $\dot{q}_v$ – скорость тепловыделения объемных источников тепла.

Граничные условия для задачи теплопроводности принимаются на свободной поверхности конвективный теплообмен со средой:

$$q_s = -\lambda^* \frac{\partial \theta}{\partial n} \Big|_s = n^* (\theta_s - \theta_0) \Big|_s \quad (13)$$

наличие источника тепла на контактной поверхности

$$q_s \Big|_{s^*} = q_{s^*}. \quad (14)$$

где θ_s, θ_0 – температуры на границе области и среды, n^* – коэффициент конвективного теплообмена.

Численная реализация. В работе представлено численное моделирование процесса горячей раскатки подшипникового кольца с воздушным охлаждением. Расчетная схема процесса горячей раскатки кольца подшипника из стали ШХ15 представлена на рис. 1.

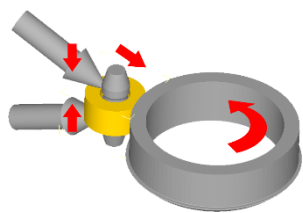


Рис. 1 – Расчетная схема процесса горячей раскатки кольца подшипника

Решение нестационарной задачи термовязкопластичности получено при начальном неравномерном распределении температурного поля кольца, представленном на рис. 2, которое устанавливается в заготовке после процесса штамповки и остывании, а также для случая, когда заготовка равномерно нагрета до исходной температуры 1100°C.

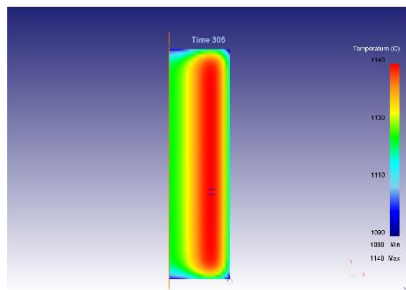


Рис. 2 – Температурное поле заготовки

Для определения параметров напряженно-деформированного состояния кольца подшипника при раскатке методом конечного элемента на основе инкрементального независимого (смешанного) подхода Лагранжа-Эйлера численно была решена

связанная нестационарная контактная задача термовязкопластичности.

Нелинейная нестационарная задача решается итерационным методом Ньютона-Рафсона. Модель материала задавалась полученным экспериментально семейством кривых деформирования в широком диапазоне скоростей деформаций и температур.

Обсуждение результатов. При определении параметров напряженно-деформированного состояния в кольце подшипника, вычислялись значения величины контактных усилий (контактных давлений) между роликом и заготовкой. На рис. 3 приведен график изменения суммарных контактных усилий, возникающих в процессе раскатки заготовки кольца: кривая 1 соответствует изменению контактного усилия при предварительном равномерном нагреве заготовки; кривая 2 – при начальном неравномерном распределении температуры по толщине заготовки. Сравнение двух кривых показывает, что в реальных условиях необходимо прикладывать большее усилие при раскатке подшипникового кольца за счет начального неравномерного нагрева заготовки после штамповки. При построении математической модели для приближения к реальному технологическому процессу также необходимо учитывать формирование макроструктуры материала подшипникового кольца за счет течения материала, которое возникает при операциях объемной штамповки и раскатки заготовки. В работе [5] авторами исследовалось влияние процесса укладки волокон при двухпроходной формовке на распределение волокнистой структуры при раскатке подшипникового кольца. Для данного распределения волокнистой структуры материала заготовки кольца расчетным путем было получено также изменение суммарного контактного усилия, представленное кривой 3 на рис. 3.

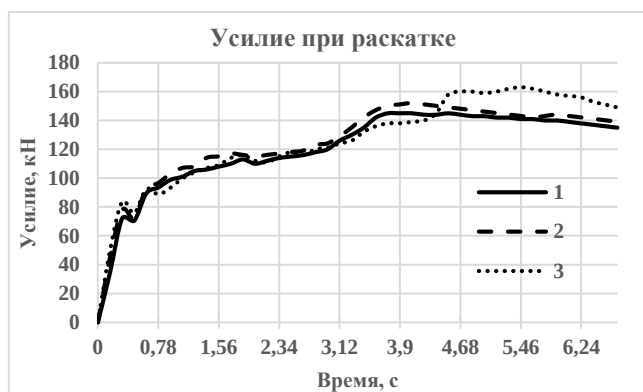


Рис. 3 – Графики изменения суммарных контактных усилий

Сравнение кривой 3 с кривыми 1 и 2 на рис. 3 показал увеличение суммарного контактного усилия на 10%, однако в этом случае формируется рациональное распределения волокнистой структуры

материала кольца подшипника, которая приводит к повышению его долговечности в процессе эксплуатации.

Выводы. В работе проведено численное моделирование процесса горячей раскатки подшипникового кольца. Методом конечных элементов с использованием независимого подхода Лагранжа-Эйлера численно была решена нестационарная контактная термовязкопластическая задача при постоянном и неравномерном начальном распределении температурного поля в заготовке. Результаты расчетов напряженно-деформированного состояния показали, что учет неравномерного нагрева заготовки кольца, соответствующего реальным условиям процесса раскатки, повышает величину

суммарных контактных усилий. Сравнение величин суммарных контактных усилий, возникающих при раскатке цилиндрической заготовки, полученной способом однопроходной и двухпроходной формовки, показало рост усилия раскатки. Однако, незначительное повышение энергозатрат на технологическую операцию раскатки позволяет получить подшипниковые кольца с улучшенными прочностными характеристиками.

Список литературы

1. Wang M. Dynamic explicit FE modeling of hot ring rolling process / M. Wang, H. Yang, Z.-C. Sun, L.-G. Guo // Trans. Nonferrous Met. Soc. China. – 2006. – № 16. – P. 1274.
2. Davey K. A practical method for finite element ring rolling simulation using the ALE flow formulation / K. Davey, M.J. Ward // International Journal Mechanical Science. – 2002. – V.44. – P. 165.
3. Симсон Э.А. Влияние трения на напряженно-деформированное состояние кольца при холодной раскатке / Э.А. Симсон, Scicluna Steven, В.Л. Хавин, Л. В. Автономова // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Х.: НТУ «ХПІ». – 2013. – №43. – с. 206–211.
4. Wang M. Analysis of coupled mechanical and thermal behaviors in hot rolling of large rings of titanium alloy using 3D dynamic explicit FEM / M. Wang, H. Yang, Z. C. Sun, L. G. Guo // Journal of Materials Proces. Technology. – 2009. – V. 209. – P. 3384.
5. Автономова Л.В. Моделирование процесса горячей раскатки колец подшипника / Л.В. Автономова, Е.Д. Грозенок, С.А. Симсон // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х.: НТУ «ХПІ». – 2015. – №4. – с. 158–161.
6. Avtonomova L. V. Formation of fibrous macrostructure in a bearing ring at stamping and rolling. / L. V. Avtonomova, Ie. D. Grozenok, E. A. Simson // Eastern European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – V. 3. – №1(87). – p. 63–68.

Bibliography (transliterated)

1. Wang M., Yang, H., Sun, Z.-C., Guo, L.-G. Dynamic explicit FE modeling of hot ring rolling processio. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*. No 16, 2006, p. 1274
2. Davey K., Ward M.J. (2002). A practical method for finite element ring rolling simulation using the ALE flow formulation. *International Journal Mechanical Science*, V.44, p.165–190.
3. Simson E.A., Scicluna S., Khavin V.L., Avtonomova L.V. (2013). The effect of friction on the stress-strain state of the ring in the cold rolling. *Vestnik National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, NTU «KPI»*, No43(1016), p. 206–211.
4. Wang M., Yang H., Sun Z. C., Guo L. G. (2009). Analysis of coupled mechanical and thermal behaviors in hot rolling of large rings of titanium alloy using 3D dynamic explicit FEM. *Journal of Materials Proces. Technology*, V. 209, – p. 3384.
5. Avtonomova L. V., Grozenok, Ie. D., Simson, E. A. (2015). Modelirovanie protsessa goryachey raskatki kolets podshipnika. *Vestnik Natsionalnogo tehnicheskogo universiteta "KPI": Seriya: Tehnologii v mashinostroenii, Kharkiv, NTU «KPI»*, No4, p.158–161.
6. Avtonomova L. V., Grozenok, Ie. D., Simson, E. A. (2017) Formation of fibrous macrostructure in a bearing ring at stamping and rolling. *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*, V. 3, No1(87) – p. 63–68.

Надійшло (received) 28.10.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Чисельне визначення контактних зусиль гарячому розкочуванню заготовки підшипникового кільця / Л.В. Автономова, Е.Д. Грозенок, О.В. Степук, С.Ю. Погорелов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – №35(1257). – С. 5–9 – Библиогр.: 6 назв. – ISSN 2519-2671

Численное определение контактных усилий при горячей раскатке заготовки подшипникового кольца / Л.В. Автономова, Е.Д. Грозенок, А.В. Степук, С.Ю. Погорелов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – №35(1257). – С. 5–9 – Библиогр.: 6 назв. – ISSN 2519-2671

The contact forces' numerical valuation during hot rolling of the bearing ring / L.V. Avtonomova, Ie.D. Grozenok, A.V. Stepuk, S.I. Pogorelov // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Innovative technologies and equipment of materials processing in engineering and metallurgy. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2017. – No 35(1257). – P. 5–9. – Bibl.:6. – ISSN 2519-2671

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Автономова Людмила Володимирівна – кандидат технічних наук, провідний науковий співробітник НТУ «ХПІ», тел.: (057)-70– 761-78, e-mail: lavtonomova@gmail.com

Автономова Людмила Владимировна – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник НТУ «ХПИ», тел.: (057)-70– 761-78, e-mail: lavtonomova@gmail.com

Avtonomova Ludmila – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), leading researcher, National Technical University Kharkiv Polytechnic Institute, tel.: (057)-70– 761-78, e-mail: lavtonomova@gmail.com

Грозенюк Євген Денисович – аспірант НТУ «ХПІ», тел.: (057)-70-761-78, e-mail: ev.grozenok@gmail.com

Грозенюк Евгений Денисович – аспірант НТУ «ХПИ», тел.: (057)-70-761-78, e-mail: ev.grozenok@gmail.com

Grozenok Ievgen – postgraduate student of National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", tel.: (057)-70-761-78, e-mail: ev.grozenok@gmail.com

Степук Олександр Володимирович – кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник НТУ «ХПІ», тел.: (057)-70– 761-78, e-mail: : abtop@yahoo.com

Степук Александр Владимирович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник НТУ «ХПИ», тел.: (057)-70– 761-78, e-mail: : abtop@yahoo.com

Stepuk Alexander – Candidate of Physics -Mathematical Sciences (Ph. D.), sr. researcher, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", tel.: (057)-70– 761-78, e-mail: abtop@yahoo.com

Погорелов Сергій Юрійович – кандидат технічних наук, доцент НТУ «ХПІ», м. Харків; тел.: (057) 707-61-78; e-mail: ark95@ukr.net

Погорелов Сергей Юрьевич – кандидат технических наук, доцент НТУ «ХПИ», г. Харьков; тел.: (057) 707-61-78; e-mail: ark95@ukr.net

Pogorelov Sergey – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), National technical university «Kharkov polytechnic institute», tel.: (057) 707-61-78; e-mail: ark95@ukr.net

УДК 621.771.8

О.В. ЗАГОРЯНСКИЙ

ФОРМИРОВАНИЕ СВОЙСТВ ЛИСТОВОЙ ДВУХСЛОЙНОЙ КОРРОЗИОННО-СТОЙКОЙ СТАЛИ, ПОЛУЧЕННОЙ ПЛАКИРОВАНИЕМ ПРОКАТКОЙ

Статья посвящена исследованию механических свойств двухслойного коррозионно-стойкого листового проката (на примере композиции сталей 09Г2С и 12Х18Н10Т), получаемого плакированием прокаткой. Технологические параметры процесса плакирования прокаткой принимались в соответствии с разработанной ранее моделью. Установлено, что максимальная прочность соединения слоев обеспечивается при относительной деформации в первом проходе плакирования прокаткой не менее 45%. Механические испытания образцов из полученных двухслойных листов определялись в соответствии с методикой испытаний, приведенной в ГОСТ 10885-85. Описана методика испытаний слоев на отрыв и приведены результаты испытаний. Результаты механических испытаний двухслойных листов показали, что значения механических свойств двухслойных листов значительно превышают минимальные регламентированные стандартом для данного вида проката.

Ключевые слова: коррозионно-стойкая сталь, низколегированная сталь повышенной прочности, плакирование прокаткой, двухслойная композиция, механические свойства.

Стаття присвячена дослідженню механічних властивостей двошарового корозійно-стійкого листового прокату (на прикладі композиції сталей 09Г2С і 12Х18Н10Т), одержуваного плакуванням прокаткою. Технологічні параметри процесу плакування прокаткою приймалися відповідно до розробленої раніше моделлю. Встановлено, що максимальна міцність з'єднання шарів забезпечується при відносній деформації в першому проході плакування прокаткою не менше 45%. Механічні випробування зразків з отриманих двошарових листів визначалися відповідно до методики випробувань, наведеної в ГОСТ 10885-85. Описана методика випробувань шарів на відрив і наведені результати випробувань. Результати механічних випробувань двошарових листів показали, що значення механічних властивостей двошарових листів значно перевищують мінімальні регламентовані стандартом для даного виду прокату.

Ключові слова: корозійно-стійка сталь, низьколегована сталь підвищеної міцності, плакування прокаткою, двошарова композиція, механічні властивості.

The article is devoted to the investigation of the mechanical properties of a two-layer corrosion-resistant sheet metal (for example, the composition of steels 09Г2С and 12Х18Н10Т), obtained by cladding by rolling. The necessity of conducting theoretical and experimental investigations of the process of obtaining a two-layer rolled metal is due to the continuous expansion of the sphere of its application, increasing requirements to its properties. On the base of analysis of the components of the corrosion-resistant two-layer bimetallic sheet to explore the regularities of properties formation of corrosion-resistant bimetal obtained using the method of cladding by rolling. As methodology were used the regularities of the formation and behavior of various phases in alloy steels, which influence the composition, properties and processing of steels. As findings of the paper we can consider promising technologies for production and further processing of laminated metal composites are specific, the output parameters of the process depend on various factors associated with the application of considerable deforming forces and the use of high-energy treatment methods, therefore require further theoretical and experimental development. Originality (value) of the paper consists in investigating the regularities of formation of properties of corrosion-resistant bimetal obtained using the method of cladding by rolling.

Keywords: corrosion-resistant steel, low-alloy steel of high strength, cladding by rolling, two-layer composition, mechanical properties.

Введение. Одним из способов повышения коррозионной стойкости сталей является их специальное легирование за счет введения элементов, увеличивающих термодинамическую устойчивость стали или образующих на поверхности защитную пленку. Однако применение коррозионно-стойких металлов, в частности стали аустенитного класса, ограничено. Это вызвано ее высокой стоимостью, обусловленной содержанием дорогих и дефицитных хрома и никеля, а также пониженной прочностью по сравнению, к примеру, с низколегированными сталями повышенной прочности. Применение вместо коррозионно-стойких сталей слоистых металлических композиций данного назначения, чаще всего двухслойных сталей, позволяет уменьшить стоимость конструкций.

Анализ последних исследований и литературы. Известно, что на сегодняшний день для производства коррозионно-стойкого биметаллического проката главным образом используются плакирование пакетной прокаткой с вакуумированием пакетов [1], электрошлаковая наплавка, а также плакирование взрывом [2].

Комплекс свойств, включающий высокие коррозионную стойкость плакирующего слоя и прочность основного слоя, является основным

преимуществом коррозионно-стойких биметаллов перед монометаллами данного назначения. Коррозионно-стойкая двуслойная сталь обладает в 2-3 раза более высокой теплопроводностью, чем монометаллические коррозионно-стойкие стали, что определяет их применение для теплообменной аппаратуры.

Наиболее широкое использование в промышленности получили двухслойные стали с плакирующим слоем из аустенитных хромоникелевых сталей 08(12)Х18Н10, стабилизированных титаном или ниобием, а также хромистой ферритной стали 08Х13 и хромоникелевой стали с молибденом (10Х17Н13М2Т). Известно [1], что на 1990 г. выпуск листов с плакирующим слоем из хромоникелевых сталей составил три четверти общего объема производства биметаллического коррозионно-стойкого проката.

Способность плакирующего слоя двухслойной стали противостоять коррозии в той или иной среде определяет области ее применения. Сталь 12Х18Н10Т относится к сталям для применения в средах средней агрессивности. Сталь устойчива по отношению к азотной, холодной фосфорной и органическим кислотам (за исключением уксусной, муравьиной, молочной, щавелевой), к растворам многих солей и

щелочей, морской воде, влажному воздуху; неустойчивы в соляной, серной, плавиковой, горячей фосфорной, кипящих органических кислотах. Обладает удовлетворительной сопротивляемостью межкристаллитной коррозии.

Сталь 12X18H10T обычно применяют в виде холоднокатаного листа (лист толстый – ГОСТ 7350-77 «Сталь толстолистовая коррозионно-стойкая, жаростойкая и жаропрочная. Технические условия», лист тонкий – ГОСТ 5582-75 «Прокат тонколистовой коррозионно-стойкий, жаростойкий и жаропрочный. Технические условия») или ленты (ГОСТ 4986-79 «Лента холоднокатаная из коррозионно-стойкой и жаростойкой стали. Технические условия»).

По ГОСТ 7350-77 сталь 12X18H10T в листовом прокате сечением свыше 4 мм должна иметь следующие механические свойства: σ_T не менее 236 МПа; σ_B не менее 530 МПа; δ_5 не менее 38. Для листового проката из стали 12X18H10T по ГОСТ 7350-77 применяется закалка при 1000...1080 °С.

Низколегированные стали повышенной прочности широко применяются вместо низкоуглеродистых сталей (при этом уменьшение расхода металла составляет 20...50%) [4]. В сравнении с последними, они характеризуются повышенной стойкостью против коррозии, меньшей чувствительностью к хрупким разрушениям. К их основным недостаткам относятся несколько большая стоимость, повышенная чувствительность к концентрации напряжений.

По ГОСТ 5520-79 «Прокат листовой из углеродистой, низколегированной и легированной стали для котлов и сосудов, работающих под давлением» сталь 09Г2С в листовом прокате толщиной 80...160 мм имеет следующие механические свойства: σ_T не менее 265 МПа; σ_B не менее 430 МПа; δ_5 не менее 21 %; при +20 °С ударная вязкость КСЧ должна быть не менее 59 Дж/см².

В настоящее время к главным задачам в области производства и применения слоистых металлических композиций следует отнести расширение сортамента и повышение их качества (увеличение прочности соединения слоев, улучшение геометрических параметров и точности композиций, стабилизацию механических свойств и структуры, улучшение качества поверхности, в том числе улучшение ее служебных свойств, и т. д.), а также дальнейшее расширение областей их применения в различных отраслях хозяйства, что должно базироваться на анализе потребности (существующей и перспективной) в различных видах слоистых металлических композиций, а также на производственных возможностях действующего технологического оборудования [3,6].

Цель исследования, постановка проблемы. Экспериментальная апробация разработанной ранее методики определения оптимальных параметров получения плакированием прокаткой двухслойного коррозионно-стойкого листового проката (на примере сочетания сталей 9Г2С и 12X18H10T) и исследование

механических свойств двухслойных листов из сталей этой композиции.

Материалы исследований. Исследователями Кременчугского национального университета имени Михаила Остроградского проведен комплекс исследований по получению плакированием прокаткой и дальнейшей обработке коррозионно-стойких двухслойных композиций толщиной 20 мм: материал основного слоя – лист стали 09Г2С, материал плакирующего слоя – лист стали 12X18H10T.

Параметры плакирования прокаткой назначались с учетом известной модели [5] расчета оптимальных параметров плакирования, согласно которой в диапазоне скоростей прокатки (2...20 м/с) и при диаметрах валков 100, 200, 400 и 500 мм, температуре нагрева пакетов 1100...1150 °С, прочное соединение получается при степени деформации в первом проходе, равной не менее 45%.

Кратко опишем использованную методику механических испытаний полученного листового коррозионно-стойкого биметалла. Методы испытаний двухслойных листов приведены в п. 4 ГОСТ 10885-85.

Размеры полученных двухслойных листов и их неплоскостность контролировались (согласно п. 4.3 ГОСТ 10885-85) в соответствии с требованиями ГОСТ 19903-74 «Прокат листовой горячекатаный. Сортамент» и ГОСТ 26877-91 «Металлопродукция. Методы измерения отклонений формы».

Сплошность сцепления слоев (согласно п. 4.15 ГОСТ 10885-85) проверялась ультразвуковым контролем по ГОСТ 22727-88 «Прокат листовой. Методы ультразвукового контроля».

Образцы для испытаний на растяжение и ударный изгиб отбирались (согласно пункту 4.4 ГОСТ 10885-85) в соответствии с требованиями межгосударственного стандарта ГОСТ 7564-97 «Прокат. Общие правила отбора проб, заготовок и образцов для механических и технологических испытаний».

Испытание на растяжение проводилось (согласно пункту 4.11 ГОСТ 10885-85) по ГОСТ 1497-84 «Металлы. Методы испытаний на растяжение» на образцах с коррозионно-стойким слоем. Листы толщиной 16–25 мм испытывают на плоских образцах.

Испытание на ударный изгиб основного слоя при нормальной и пониженной температурах (согласно п. 4.12 ГОСТ 10885-85), проводилось на образцах с предварительно удаленным коррозионно-стойким слоем по ГОСТ 9454-78 «Металлы. Метод испытаний на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах». За результаты испытаний принималось среднее арифметическое из трех образцов.

Наиболее распространенным количественным методом оценки прочности соединения слоев в биметаллах является испытание, проводимое с целью определения прочности на срез и отрыв. Испытание образцов на срез имеет целью количественно

установить прочность связи плакирующего и основного слоев.

Прочность соединения слоев двухслойных листов (согласно пункту 4.6 ГОСТ 10885-85) проверялись испытанием на срез с определением сопротивления срезу по плоскости соприкосновения основного и коррозионно-стойкого слоев. Для испытаний на срез при толщине биметалла свыше 8 мм используют образцы со «ступенькой», получившие широкое распространение как у нас в стране, так и за рубежом.

Форма образца со «ступенькой», схема и метод испытания двухслойных листов приведены в обязательном приложении «Метод испытания двухслойных листов на срез коррозионно-стойкого слоя» к ГОСТ 10885-85. Согласно п. 2.16 ГОСТ 10885-85, сопротивление срезу при определении по требованию потребителя прочности соединения слоев стали с плакирующим покрытием 2 мм и более должно быть не менее 147 Н/мм² (МПа).

Прочность сцепления слоев в биметаллах определяют по результатам испытания на отрыв по известным методикам [7,8]. Испытание на отрыв для биметаллических образцов (как биметаллического проката, так и полученных плакированием взрывом) толщиной свыше 20 мм производят при растяжении стандартных цилиндрических образцов (рис. 1) [7,8]. На рис. 1 обозначены: 1 – основной слой; 2 – плакирующий слой; 3 – зона соединения, Р – прилагаемая нагрузка.

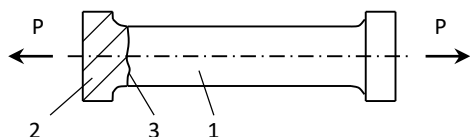


Рис. 1 – Схема испытания образцов биметалла (толщиной свыше 20 мм) для определения прочности соединения слоев на отрыв

Толщины исходных листов плакирующего слоя из стали 12Х18Н10Т были приняты (здесь и далее размеры по рекомендациям [5]) равными 15 мм, толщины листов основного слоя из стали 09Г2С – 85 мм. Размеры исходных листов из стали 09Г2С были приняты 85×1200×1900, листов из стали 12Х18Н10Т – 15×1100×1750 мм (в соответствии с ГОСТ 19903-74 «Прокат листовой горячекатаный. Сортамент»).

Толщины полученных двухслойных листов составили 21,3...19 мм, что для номинальной толщины листов 20 мм соответствует (согласно п. 1.4 ГОСТ 10885-85) диапазону предельных отклонений ±1,4 мм.

Толщина плакирующего слоя составила 2,7...3,6 мм, что для номинальной толщины листов 20 мм соответствует (согласно п. 1.2 ГОСТ 10885-85) диапазону толщин 2,5...3,5 мм для нормальной толщины коррозионно-стойкого слоя и 3...4 мм для повышенной толщины.

Сплошность сцепления слоев полученной двухслойной стали, проверенная на 100 % листов, показала практически полную сплошность. На одном

листе определена несплошность у кромки длиной стороны листа.

Результаты испытаний механических свойств двухслойных листов, полученных плакированием прокаткой (без последующей термической обработки), приведены в табл. 1 ($\sigma_{ср}$ – прочность соединения слоев листа на срез, $\sigma_{отр}$ – прочность соединения слоев листа на отрыв).

Таблица 1 – Механические свойства биметаллических листов 09Г2С+12Х18Н10Т толщиной 20 мм, полученных плакированием прокаткой (без термообработки)

Механические свойства	Нормируемое минимальное значение по ГОСТ	Среднее по пяти образцам
$\sigma_{т}$, МПа	325	362
$\sigma_{в}$, МПа	470	504
δ_5 , %	21	19
KCU ⁺²⁰ , Дж/см	59	67
$\sigma_{ср}$, МПа	147	306
$\sigma_{отр}$, МПа	–	435

Согласно п. 2.6 ГОСТ 10885-85 «Сталь листовая горячекатаная двухслойная коррозионно-стойкая. Технические условия», механические свойства двухслойных листов, к которым относятся и исследуемые в работе листы из сочетания марок стали основного и плакирующего слоев 09Г2С+12Х18Н10Т, должны соответствовать требованиям стандартов на сталь марок основного слоя. Для стали основного слоя марки 09Г2С, согласно п. 2.6 ГОСТ 10885-85, – это ГОСТ 5520-79 «Прокат листовой из углеродистой, низколегированной и легированной стали для котлов и сосудов, работающих под давлением».

В табл. 1 для сравнения приведены нормируемые минимальные значения механических свойств двухслойных листов по ГОСТ 5520-79 для стали основного слоя 09Г2С толщиной от 10 до 20 мм и минимальное значение сопротивления срезу по ГОСТ 10885-85.

В случае, когда прочность стали плакирующего слоя выше, чем прочность стали основного слоя (случай рассматриваемой композиции), полную усредненную прочность биметалла можно определить по зависимости [7]:

$$\sigma_{ср}^{12} = \sigma_{ср}^1 + R(\sigma_{ср}^2 - \sigma_{ср}^1), \quad (1)$$

где $\sigma_{ср}^{12}$, $\sigma_{ср}^1$ и $\sigma_{ср}^2$ – соответственно пределы прочности биметалла, основного и плакирующего слоя, R – доля плакирующего слоя в общей толщине металла.

Для полученных образцов отличие значений предела прочности двухслойных листов по результатам механических испытаний (средним по пяти образцам) и по зависимости (1) не превышает 5%, что позволяет использование зависимости (1) для прогнозирования прочности двухслойных листов.

Выводы. Двухслойная коррозионно-стойкая сталь, где в качестве плакирующего слоя используется аустенитная коррозионно-стойкая сталь 12Х18Н10Т (наиболее распространенная сталь для плакирующего слоя), а в качестве основного слоя – низколегированная сталь повышенной прочности 09Г2С (благодаря своей распространенности и относительной дешевизне), имеет прочность заметно

выше по сравнению с композициями, где в качестве основного слоя применяются низкоуглеродистые стали. Композиция 09Г2С+12Х18Н10Т имеет широкие перспективы использования в различных изделиях и конструкциях, в первую очередь для работы в средах средней агрессивности при требованиях к повышенной прочности конструкции.

Результаты механических испытаний двухслойных листов, полученных с использованием разработанной ранее модели для определения оптимальных температурно-скоростных параметров плакирования прокаткой, показали, что значения механических свойств двухслойных листов значительно превышают минимальные регламентированные стандартом для данного вида проката. Это же справедливо для прочности соединения слоев в полученных двухслойных листах. Значения прочности на отрыв двухслойных листов, полученных плакированием прокаткой, максимальны при относительной деформации не менее 45%.

Список литературы

1. Быков А. А. Развитие производства биметаллов. Ч. 1 / А. А. Быков // Металлург. – 2009. – № 8. – С. 70–75.
2. Dragobetsky V. V. Process modeling of elastic-plastic deformation of steel-aluminum compositions produced by impact bonding / V. V. Dragobetsky, V. G. Zagoryansky, A. V. Voronin // Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – № 9. – pp. 1186–1189.
3. Луценко В. О. Напрямки розвитку виробництва двошарових листів [Електронний ресурс] / В. О. Луценко // Електронне наукове фахове видання «Науковий вісник Донбасу». – 2007. – № 4 (4). – Режим доступу: <http://nvd.luguniv.edu.ua/archiv/NN4/07lvovdl.pdf>.
4. Чертов І. М. Зварні конструкції / І. М. Чертов. – К.: Арістей, 2006. – 376 с.
5. Драгобецький В. В. Моделирование оптимальных температурно-скоростных режимов сварки прокаткой коррозионно-стойкого биметалла / В. В. Драгобецький, С. В. Галата // Вісник Східноукраїнського національного університету імені

Володимира Даля. – № 2 (191). – Ч. 1. – Луганськ: СХУ імені Володимира Даля, 2013. – С. 5–9.

6. Шабалов И. П. Ресурсосберегающие технологии производства толстолистового проката с повышенными потребительскими свойствами / И. П. Шабалов, З. К. Шафигин, А. Н. Муратов. – М.: Металлургиздат, 2007. – 352 с.
7. Лысак В. И. Материаловедение и технология композиционных материалов: учебник для вузов / В. И. Лысак, А. Г. Кобелев, В. Н. Чернышев. – М.: Интернет Инжиниринг, 2005. – 368 с.
8. Лысак В. И. Сварка взрывом: научная монография / В. И. Лысак, С. В. Кузьмин. – М.: Машиностроение-1, 2005. – 544 с.

References (transliterated)

1. Bykov, A. A. "Development of production of bimetals", *Metallurg.* No. 8. 2009. 70–75. Print.
2. Dragobetsky, V. V., V. G., Zagoryansky and A. V. Voronin "Process modeling of elastic-plastic deformation of steel-aluminum compositions produced by impact bonding", *Metallurgical and Mining Industry.* No. 9. 2015. 1186–1189. Print.
3. Lutsenko, V. O. "Napryamki rozvytku vyrobnytstva dvohsharovykh lystiv". *Electronne naukove fahove vydannya «Naukovyy visnyk Donbasu»*, № 4 (4). 2007. <http://nvd.luguniv.edu.ua/archiv/NN4/07lvovdl.pdf>.
4. Chertov, I. M. *Zvarni konstruktsii*. Kiev: Aristey, 2006. Print.
5. Dragobetsky, V. V. and S. V. Galata. "Modelling of optimal temperature-speed modes of welding by rolling of corrosive-resistant bimetal", *Visnyk Shidnoukrains'kogo natsional'nogo univresitetu imeni Volodymira Dalya*. No. 2 (191), part 1. 2013. 5–9. Print.
6. Shabalov, I. P., Z. K. Shafigin and A. N. Muratov. *Resursosberegayushchie tehnologii proizvodstva tolstolistovogo prokata s povyshennymi potrebitel'skimi svoystvami*. Moscow: Metallurgizdat, 2007. Print.
7. Lysak, V. I., A. G. Kobelev and V. N. Chernyshev (2005), *Materialovedenie i tehnologiya kompozitsionnykh materialov*. Moscow: Internet Ingeneering, 2005. Print.
8. Lysak, V. I. *Svarka vzryvom*. Moscow: Mashinostroenie-1, 2005. Print.

Надійшла (received) 20.10.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Формування властивостей листової двошарової корозійно-стійкої сталі, отриманої плакуванням плющенням / О. В. Загорянський // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – №35(1257). – С. 10–13 – Библиогр.: 8 назв. – ISSN 2519-2671

Формирование свойств листовой двухслойной коррозионно-стойкой стали, полученной плакированием прокаткой / О. В. Загорянський // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – №35(1257). – С. 10–13 – Библиогр.: 8 назв. – ISSN 2519-2671

Formation of the properties of sheet two-layer corrosion-resistant steel produced by cladding by rolling / O. V. Zagoryanskii // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Innovative technologies and equipment of materials processing in engineering and metallurgy. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2017. – No 35(1257). – P. 10–13. – Bibl.: 8. – ISSN 2519-2671

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Загорянський Олег Володимирович – аспірант, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського; тел.: (050) 702-39-10; e-mail: olegzahor@gmail.com

Загорянський Олег Владимирович – аспірант, Кременчугский национальный университет имени Михайла Остроградського; тел.: (050) 702-39-10; e-mail: olegzahor@gmail.com

Zagoryanskii Oleg Vladimirovich – aspirant, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University; tel.: (050) 702-39-10; e-mail: olegzahor@gmail.com

УДК 621.777

В.Л. КАЛЮЖНИЙ, А.М. ПОТЯТИНИК, І.П. КУЛІКОВ, С.І. УНГУРЯН

ПРОГНОЗУВАННЯ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЗДЕФОРМОВАНОГО МЕТАЛУ ПРИ ХОЛОДНОМУ ПРЯМОМУ ВИДАВЛЮВАННІ СТЕРЖНЕВИХ ВИРОБІВ ПО СХЕМІ «ЗАГОТОВКА ЗА ЗАГОТОВКОЮ»

Методом скінченних елементів проведений аналіз холодного прямого видавлювання круглих стержнів з міді М3 по схемі «заготовка за заготовкою» з різним ступенем деформації. Для перевірки адекватності створених моделей виконаний розрахунковий аналіз такого видавлювання стержнів із сталі. 45ХНМФА-Ш, проведені експериментальні дослідження і порівняні результати по зусиллю деформування та по межі текучості здеформованого металу. Моделюванням видавлювання стержнів з міді встановлені залежності зусиль видавлювання від переміщення пуансонів, розподіли питомих зусиль на деформуючому інструменті при максимальному зусиллі деформування. Також виявлені напружено-деформований стан, ступінь використання ресурса пластичності, температура здеформованого металу та кінцеві форма і розміри виробів. На основі розрахункових даних по інтенсивності деформацій та з використанням експериментальної діаграми істинних напружень проведено прогнозування величини межі текучості здеформованого металу по перерізу стержнів після видавлювання.

Ключові слова: пряме видавлювання, круглі стержні, ступінь деформації, метод скінченних елементів, зусилля видавлювання, питомі зусилля, напружено-деформований стан, ресурс пластичності, межа текучості здеформованого металу.

Методом конечных элементов проведен анализ холодного прямого выдавливания круглых стержней с меди М3 по схеме "заготовка за заготовкой" с разной степенью деформации. Для проверки адекватности созданных моделей выполнен расчетный анализ такого выдавливания стержней из стали. 45ХНМФА-Ш, проведены экспериментальные исследования и сравнены результаты по усилию деформирования и по пределу текучести деформированного металла. Моделированием выдавливания стержней из меди установлены зависимости усилия выдавливания от перемещения пуансона, распределения удельных усилий на деформирующем инструменте при максимальном усилии деформирования. Также выявлены напряженно-деформированное состояние, степень использования ресурса пластичности, температура деформированного металла и конечные форма и размеры изделий. На основе расчетных данных по интенсивности деформаций и с использованием экспериментальной диаграммы истинных напряжений проведено прогнозирование величины предела текучести деформированного металла в продольном сечении стержней после выдавливания.

Ключевые слова: прямое выдавливание, круглые стержни, степень деформации, метод конечных элементов, усилие выдавливания, удельные усилия, напряжения, деформации, предел текучести деформированного металла.

The finite element method was used for carried out the analysis of cold forward extrusion of round rods according to the scheme "workpiece behind the workpiece" of core products with varying degrees of deformation. To verify the adequacy of the created models, a computational analysis of such extrusion of steel 45ChNMFA-SH rods was performed, also were carried out the experimental researches and compared results of the deformation force and the yield strength of the deformed metal. There're identified dependence of the extrusion's forces of moving punch and the distribution of the normal stress on the deforming tool at maximum force deformation by modeling the extrusion of copper rods. Also revealed are the stress-strain state, the degree of using the resource of plasticity, the temperature of the deformed metal, and the final shape and size of the products. Based on calculated data of the intensity of deformation, using the experimental diagram of true stress were conducted prediction values of the yield strength of the deformed metal in the longitudinal section of the rods after extrusion.

Keywords: forward extrusion, round rods, degree of deformation, finite element method, extrusion's force, normal stress, deformation, yield strength of the deformed metal.

Вступ. При виготовленні виробів холодним об'ємним штампуванням (ХОШ) актуальним є вирішення задач по розширенню марок матеріалів для холодного формоутворення, ускладнення геометричної форми виробів та по отримання відповідальних деталей із заданими вимогами по фізико-механічних властивостях здеформованого металу. В теперішній час технологічні процеси ХОШ та конструкції штампового оснащення проектується в основному для отримання виробів необхідної форми по даних джерел [1, 2], які базуються на виробничому досвіді та експериментальних даних. Для холодного видавлювання стержневих виробів прямим видавлюванням мають місце окремі експериментальні дані по впливу холодної деформації на властивості здеформованого металу [3, 4]. Однак проведення експериментальних робіт зараз пов'язано зі значними матеріальними затратами та потребує багато часу. Тому також актуальними задачами є створення математичних моделей, які на стадії проектування технології ХОШ дозволяють достатньо швидко отримати параметри для виготовлення необхідної форми виробів, та встановлення можливості

пропрацювання структури металу холодною пластичною деформацією по об'єму виробів або в окремих його частинах. Використання метода скінченних елементів (МСЕ) для розрахункового аналізу холодного прямого видавлювання дозволяє встановлювати зусилля видавлювання, питомі зусилля на деформуючому інструменті, напружено-деформований стан у здеформованому металі та кінцеві форми і розміри виробів [5–8]. Однак практично відсутні такі дані для процесу холодного прямого видавлювання круглих стержнів по схемі «заготовка за заготовкою». Вказаний процес широко використовують для отримання стержнів з заданими механічними властивостями здеформованого металу.

Пряме видавлювання по схемі «заготовка за заготовкою». Пряме видавлювання по схемі «заготовка за заготовкою» з позначеннями зображено на рис. 1. Ліворуч від вісі симетрії наведене положення перед видавлюванням, праворуч – в процесі видавлювання. Першу заготовку 1 діаметром D_0 і висотою H_0 встановлюють в конічній матриці 2, на якій розміщений контейнер 3 (рис. 1а). Контейнер

3 і матрицю 2 фіксують на плиті 4. Деформування виконують за допомогою пуансона 5 та отримують напівфабрикат 6.

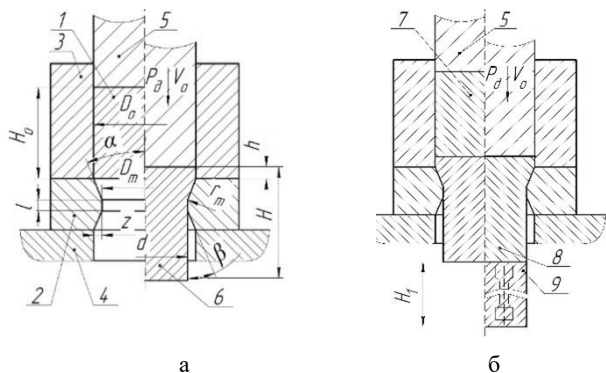


Рис. 1 – Виготовлення деталі прямим видавлюванням по схемі «заготовка за заготовкою»: а – схема видавлювання першої заготовки, б – схема видавлювання другої заготовки

Після видавлювання першої заготовки в контейнер 3 розміщують другу заготовку 7, яка при формоутворенні другого напівфабриката 8, дозволяє отримати виріб 9, що має висоту H_1 (рис. 1б). Визначення механічних властивостей здеформованого металу виконують випробуванням на розтяг стандартних зразків, які вирізають в поздовжньому напрямку з виробу 9 (показано тонкими лініями).

Мета роботи. Метою роботи є встановлення впливу ступеня деформації на параметри формоутворення круглих стержнів прямим видавлюванням по схемі «заготовка за заготовкою» та визначення межі текучості здеформованого металу.

Постановка задачі для моделювання прямого видавлювання по схемі «заготовка за заготовкою». Встановлення параметрів холодного прямого видавлювання круглих стержнів проведено шляхом створення математичних моделей з використанням МСЕ та проведенням чисельних експериментів із застосуванням програми DEFORM. Використана пружно-пластична модель ізотропного металу. Деформуючий інструмент вважався абсолютно жорстким. Тертя враховували по Кулону з коефіцієнтом тертя $\mu = 0,08$. Швидкість деформування складала $V_0 = 2$ мм/сек.

Перевірку адекватності створених моделей на основі МСЕ проводили на розрахунках прямого видавлювання заготовки із сталі 45ХНМФА-Ш з подальшим проведенням експериментальних досліджень. Розміри заготовки – $D_0 = 38$ мм, $H_0 = 250$ мм. Деформування виконували пуансоном діаметром $D_n = 38$ мм через конічну матрицю з $D_m = 32$ мм, $\alpha = 16^\circ$, $\beta = 45^\circ$, $l = 3$ мм, $r_m = 1$ мм, $h = 5$ мм. Моделювання прямого видавлювання стержнів із міді МЗ проводили для заготовок з розмірами $D_0 = 38$ мм, $H_0 = 76$ мм. Розміри матриці були наступні: $\alpha = 16^\circ$, $\beta = 45^\circ$, $l = 3$ мм, $z = 0,15$ мм, $r_m = 2$ мм, $h = 5$ мм. Діаметр матриці D_m визначався ступенем деформації

$\varepsilon = (1 - D_m^2 / D_0^2) * 100$. Розрахунки проводили для $\varepsilon = 10, 20, 30, 40, 50, 60$ і 70% . При цьому величина діаметра D_m відповідно дорівнювала 36; 34; 31,8; 29,4; 26,9; 24 і 20,8 мм.

Перевірка адекватності результатів чисельного моделювання. Розрахункові схеми в розрізі на початку та в кінці видавлювання першої і другої заготовок із сталі 45ХНМФА-Ш зображені на рис. 2. На рис. 2а наведена схема на початку видавлювання першої заготовки. Вихідна заготовка 1 розміщена в контейнері 2 на матриці 3. Зусилля деформування прикладали за допомогою пуансона 4. В результаті видавлювання першої заготовки отримували напівфабрикат 5 (рис. 2б). Другу заготовку 6 встановлювали на напівфабрикат 5 (рис. 2в). Після видавлювання другої заготовки отримували виріб 7 і напівфабрикат 8 (рис. 2г).

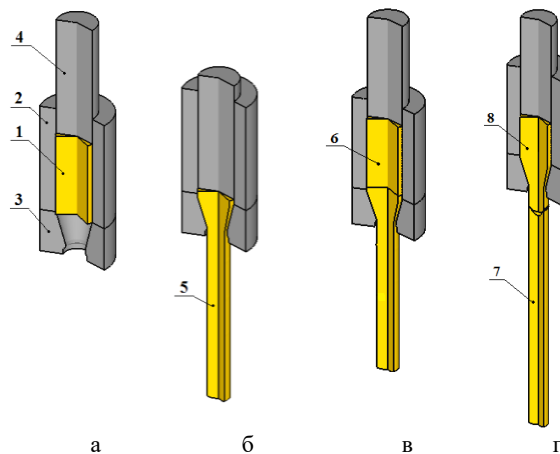


Рис. 2 – Розрахункові схеми в розрізі на початку та в кінці видавлювання першої та другої заготовок

На рис. 3 зображені залежності зусилля видавлювання від переміщення пуансона при видавлюванні першої та другої заготовок.

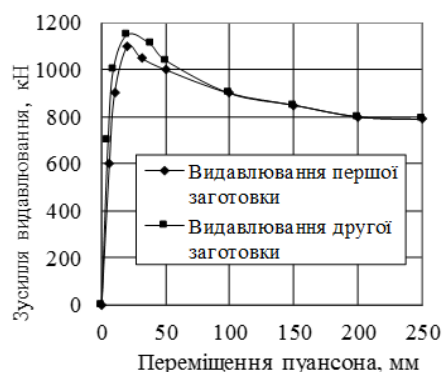


Рис. 3 – Залежності зусилля видавлювання першої та другої заготовок від переміщення пуансона

Максимальне зусилля видавлювання досягається при переміщенні пуансона на 19,9 мм і складає 1100 кН, після чого зусилля поступово спадає і в кінці видавлювання становить 800 кН. На початку видавлювання другої заготовки зусилля дещо більше

(1150 кН) від зусилля деформування першої заготовки. Для проектування штампового оснащення необхідно знати величини питомих зусиль на деформуючому інструменті. Величини питомих зусиль визначали по розподілу нормальних напружень на поверхні заготовки, що контактує з інструментом. На рис. 4 зображені розподіли питомих зусиль на деформуючому інструменті при максимальному зусиллі видавлювання другої заготовки. На рис. 4а наведений розподіл питомих зусиль по радіусу пуансона. Максимальне значення цього зусилля складає 970 МПа на радіусі 12 мм. На контейнері найбільше значення питомих зусиль 520 МПа отримане на верхній частині (рис. 4б) з подальшим зменшенням до 140 МПа в місці контакту контейнера та матриці. При таких питомих зусиллях контейнер необхідно виконувати однобандажованим. На матриці максимальне питоме зусилля 1500 МПа виникає в місці переходу конусної частини в калібруючий пояс з подальшим зменшенням до 1000 МПа на радіусі конусної поверхні 18 мм, а потім іде збільшення до 1170 МПа на радіусі 18,7 мм (рис. 4в). Такі значення питомих зусиль потребують застосування двохбандажованої матриці.

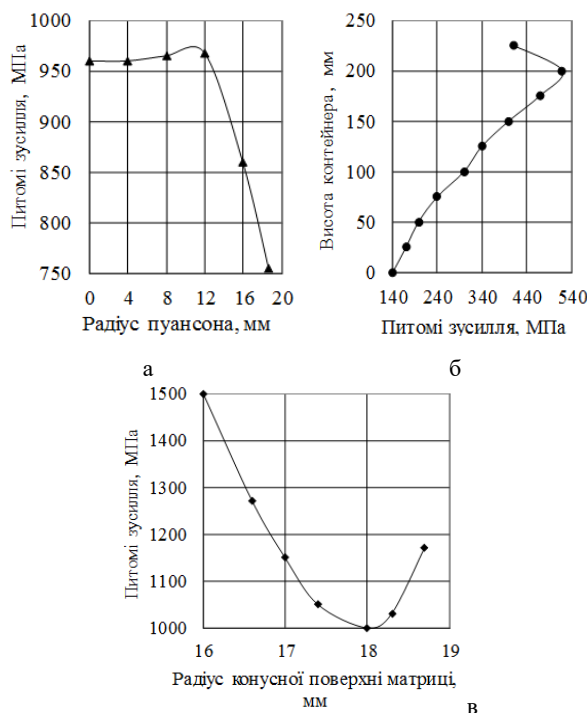


Рис. 4 – Розподіли питомих на деформуючому інструменті: а – по радіусу пунсона, б – по радіусу конусної поверхні матриці, в – по висоті контейнера

Розподіли ступеня використання ресурсу пластичності Ψ та температури у верхніх частинах здеформованих заготовок зображені на рис. 5. Тут і в подальшому тонкими лініями показаний деформуючий інструмент, а по всіях наведені розміри в міліметрах. При величині $\Psi = 1$ відбувається руйнування здеформованого металу. Ресурс

пластичності найбільше вичерпується у зовнішніх шарах металу стержня і має величину $\Psi = 0,85$ (рис. 5а). На вісі стержня отримано $\Psi = 0,25$. При холодному формоутворенні підвищується температура здеформованого металу. На рис. 5б наведений розподіл температури. По довжині стержня температура складає $T = 95^\circ \text{C}$.

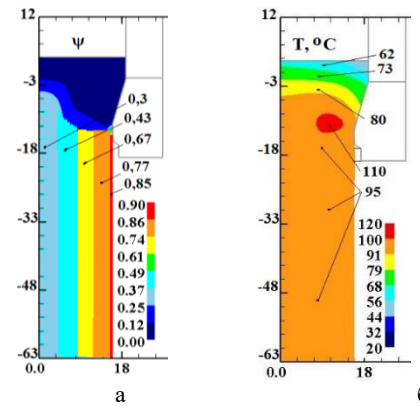


Рис. 5 – Розподіли ступеня використання ресурсу пластичності Ψ та температури у верхніх частинах здеформованих заготовок

Геометричні форми першої та нижнього торця другої заготовок та розподіл інтенсивності деформацій по ширині стержня приведені на рис. 6. На нижньому торці першої заготовки утворюється викривлення висотою 1,51 мм, а на верхньому має місце утяжина глибиною 4,34 мм (рис. 6а). На рис. 4б приведена форма нижнього торця другої і наступних заготовок з викривленням 3,3 мм (рис. 4б). Пропацювання структури металу холодною пластичною деформацією та межу текучості здеформованого металу можна оцінити по розподілу інтенсивності деформацій ε_i по ширині стержня, який приведений на рис. 4в.

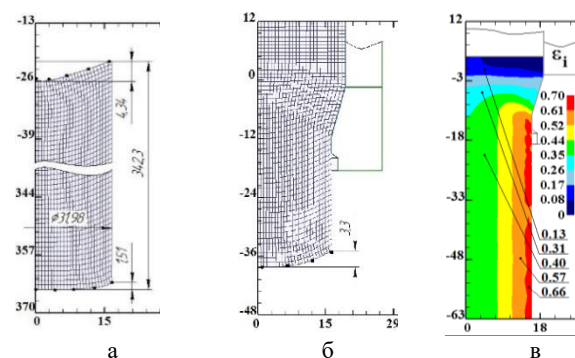


Рис. 6 – Форма та розміри в міліметрах здеформованих заготовок та розподіл інтенсивності деформацій ε_i по ширині стержня: а – форма та розміри першої заготовки, б – форма нижнього торця другої заготовки, в – розподіл ε_i

В шарах металу на вісі стержня отримано $\varepsilon_i = 0,4$. А у шарах металу зовнішньої поверхні стержня величина таких деформації знаходиться в межах $\varepsilon_i = 0,5 \div 0,7$. По експериментальній діаграмі істинних

напружень напруження текучості σ_s має значення: на вісі стержня при $\varepsilon_i=0,4$ – $\sigma_s=780$ МПа; біля зовнішньої поверхні при $\varepsilon_i=0,6$ – $\sigma_s=950$ МПа.

Для проведення експериментальних робіт по розрахункових даних було спроектовано та виготовлено штамп для прямого видавлювання по схемі «заготовка за заготовкою». Конструкція штамп для прямого видавлювання зображена на рис. 7.

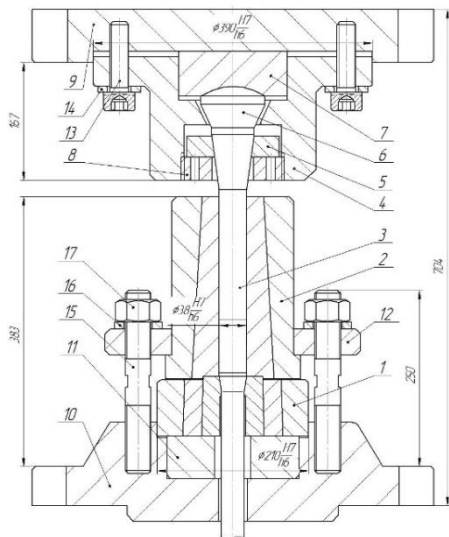


Рис. 7 – Конструкція штамп для прямого видавлювання

Двохбандажована матриця 1 і однобандажований контейнер 2 встановлені на опорі 11 та закріплені до нижньої плити 10 за допомогою кільця 12, шпильок 15, шайб 16 і гайок 17. До верхньої плити 9 гвинтами 13 з шайбами 14 закріплений пуансонотримач 4 з п'ятою 6 та підп'ятником 7. В пуансонотримачі 4 розміщені конусне кільце 5 з пуансоном 3 та фіксуються гайкою 8.

Робота штамп. В контейнер 2 встановлюють першу вихідну заготовку. При ході повзуна вниз деформують першу заготовку з пресзалишком висотою 5 мм. Після цього в контейнер 2 розміщують другу заготовку, яка після видавлювання витискує першу заготовку з матриці.

Штамп встановлювали на гідравлічному пресі ДБ2432 зусиллям 1,6 МН. Вихідні заготовки із сталі 45ХНМФА-Ш підлягали відпалу та фосфатуванню з омилюванням. Фотографії штамп на пресі, вихідної заготовки та zdeформованих заготовок показані на рис. 8. У першій та другій zdeформованих заготовках проведені заміри в перерізі торців. Результати замірів практично співпали з даними моделювання (див. рис. 6а і 6б, на яких результати показані крапками). Зусилля видавлювання першої і наступних заготовок визначали по показникам манометра преса. Максимальне зусилля видавлювання першої заготовки складало 1120 кН, а наступних – 1170 кН.

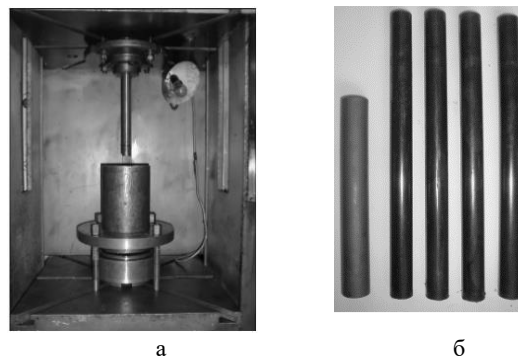


Рис. 8 – Фотографії штамп: а – на пресі, б – вихідної та zdeформованих заготовок

Відмінність з даними моделювання складає до 3 кН. Із стержнів, які отримані видавлюванням, виготовляли стандартні зразки для випробування на розтяг. По три зразки було вирізано на вісі стержня та біля зовнішньої поверхні. В результаті випробування зразків у вказаних місцях отримані величини напруження текучості відповідно $\sigma_s=760$ МПа і $\sigma_s=930$ МПа. У відпаленому стані умовна межа текучості для такої сталі складає $\sigma_{0,2}=350$ МПа. В результаті зміцнення напруження текучості збільшується в 2,2–2,6 рази. Порівняння отриманих зусиль та величин напружень текучості дозволяє зробити висновок, що результати експериментальних досліджень підтверджують адекватність створених математичних моделей.

Результати розрахунків по видавлюванню заготовок із міді МЗ. Залежності зусиль від переміщення пуансонів при видавлюванні з різним ступенем деформації ε зображені на рис. 9. Для всіх ступенів деформації зусилля зростає на неусталених стадіях до виходу металу з калібруючого пояса матриці. Далі починаються усталені стадії, на яких зусилля практично не змінюється для малих значень ε і дещо зменшується для великих величин ε .

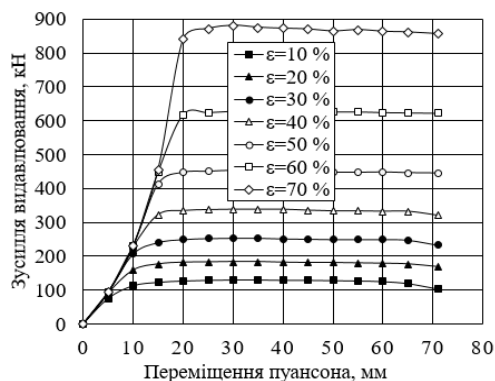


Рис. 9 – Залежності зусиль видавлювання від переміщення пуансонів при видавлюванні стержнів з міді МЗ з різним ступенем деформації ε

МСЕ дозволяє встановлювати точні розподіли нормальних напружень σ_n на контактуючих поверхнях при максимальному значенні зусилля

видавлювання, які зображені на рис. 10. На поверхні контакту між заготовкою і пуансоном напруження σ_n мають постійну величину для всіх розглянутих значень ступенів деформації. Зі зростанням величини ε напруження σ_n на торці пуансонів зростають. На поверхні контакту контейнера із заготовкою найбільші значення напружень σ_n виникають в зоні верхнього торця здеформованої заготовки, причому ці значення приблизно дорівнюють напруженням, які отримані на торці пуансона. На конусних поверхнях

матриць нормальні напруження мають максимальні значення на радіусах заокруглення цих поверхонь з калібруючими поясками. Далі по довжині конусних поверхонь напруження σ_n зменшуються до мінімуму на середині поверхонь, а потім збільшуються до кінця поверхонь. При цьому найменші величини напружень σ_n у вказаному місці отримані при видавлюванні із ступенем деформації $\varepsilon = 30\%$.

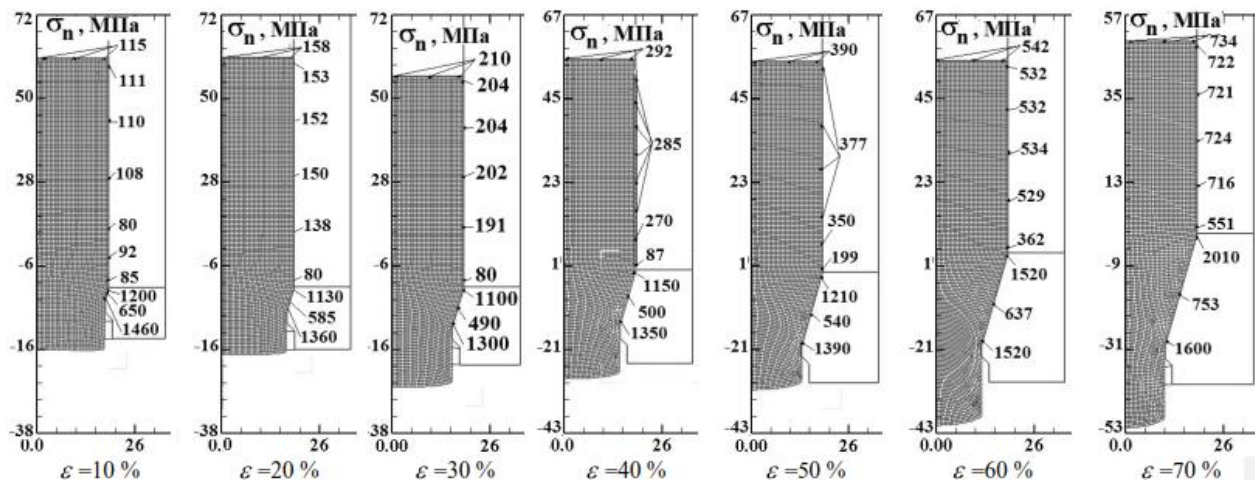


Рис. 10 – Розподіли нормальних напружень σ_n на контактуючих поверхнях між заготовкою і деформуючим інструментом

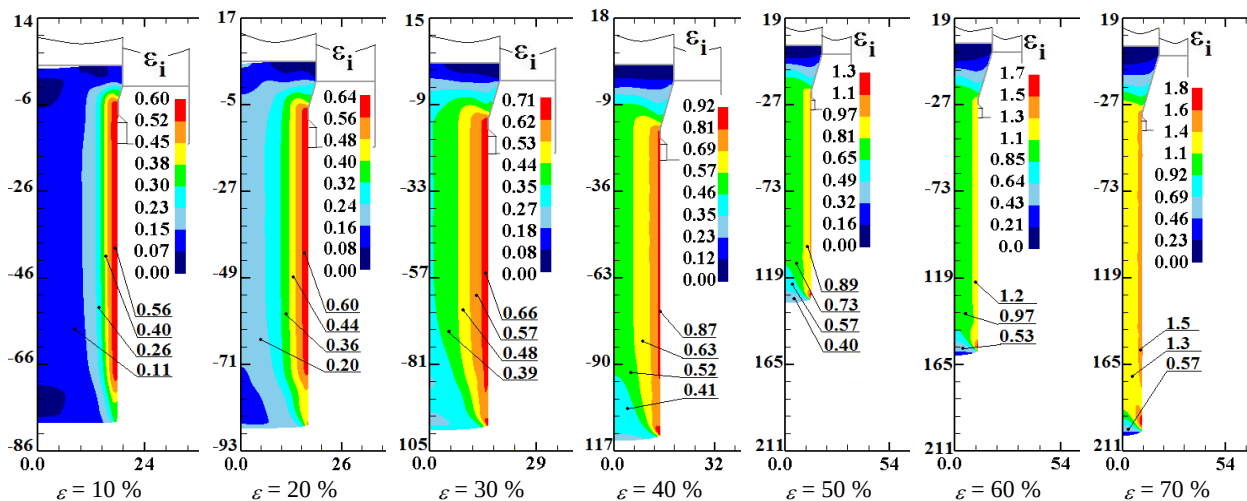


Рис. 11 – Розподіли інтенсивності деформацій ε_i у здеформованих заготовках після видавлювання з різним ступенем деформації ε

Моделюванням визначений напружено-деформований стан та розподіли інтенсивності деформацій ε_i при формоутворенні стержнів прямим видавлюванням. Розподіли інтенсивності деформацій приведені на рис. 11. Найбільші величини ε_i отримані у зовнішніх шарах металу здеформованих заготовок. Зі збільшенням величини ступеня деформації зростає інтенсивність пропрацювання структури металу холодною пластичною деформацією, причому зменшується

нерівномірність пропрацювання по перерізу заготовок. Після видавлювання з $\varepsilon = 10\%$ на вісі здеформованої заготовки отримано $\varepsilon_i = 0,07 \div 0,15$; біля зовнішньої поверхні $\varepsilon_i = 0,45 \div 0,6$. Деформування з $\varepsilon = 40\%$ та з $\varepsilon = 70\%$ забезпечило відповідно наступні величини ε_i у вказаних місцях: $\varepsilon_i = 0,46 \div 0,57$ і $\varepsilon_i = 0,69 \div 0,92$ та $\varepsilon_i = 1,1 \div 1,4$ і $\varepsilon_i = 1,4 \div 1,6$. Встановлені величини інтенсивності деформацій з використанням експериментальної діаграми

істинних напружень для міді МЗ ($\sigma_{0,2}=100$ МПа) дозволяють прогнозувати величини напруження текучості здеформованого металу по перерізу стержнів. В табл. 1 приведені дані по величинах напружень текучості здеформованого металу по перерізу стержнів, які отримані видавлюванням з різним ступенем деформації.

Таблиця 1 – Напруження текучості здеформованого металу

Ступінь деформації, ε , %	Місце визначення та величини напруження σ_s по перерізу стержнів		
	На вісі	Між віссю і зовнішньою поверхнею	Біля зовнішньої і поверхні
10	180 МПа	250 МПа	280 МПа
20	200 МПа	280 МПа	310 МПа
30	260 МПа	330 МПа	350 МПа
40	300 МПа	360 МПа	370 МПа
50	340 МПа	380 МПа	390 МПа
60	360 МПа	390 МПа	410 МПа
70	410 МПа	425 МПа	440 МПа

Висновки:

1. Моделюванням методом скінченних елементів показана можливість прогнозувати межу текучості здеформованого металу стержнів після холодного прямого видавлювання шляхом визначення інтенсивності деформації та використання експериментальної діаграми істинних напружень матеріалу стержнів.

2. Для перевірки адекватності створених моделей проведені розрахунки та експериментальні дослідження холодного видавлювання круглих стержнів із сталі 45ХНМФА-Ш. Порівняння результатів досліджень по зусиллю видавлювання, межі текучості здеформованого металу показало можливість використання МСЕ для прогнозування механічних властивостей металу після холодного формоутворення.

3. Проведене моделювання холодного прямого видавлювання круглих стержнів із міді МЗ із різним ступенем деформації. Встановлені залежності зусиль видавлювання від переміщення пуансонів, розподіли нормальних напружень на контактуючих поверхнях між металом і деформуючим інструментом та розподіли інтенсивності деформації по об'єму здеформованих заготовок. З використанням діаграми істинних напружень встановлена межа текучості здеформованого металу по перерізу стержнів, які отримані видавлюванням.

Список літератури

1. Ковка и штамповка: Справочник. В 4-х т.; т. 3. Холодная объемная штамповка / Под ред. Г.А. Навроцкого. – М.: Машиностроение, 1987. – 384 с.
2. Теория пластических деформаций металлов / Е.П. Унсков, У. Джонсон, В.Л. Колмогоров и др.; Под ред. Е.П. Ункова / Пер. с англ. А.Г. Овчинникова. – М.: Машиностроение, 1983. – 598 с.
3. Черный Ю.Ф. Гидропрессование инструментальных сталей / Ю.Ф. Черный, В.З. Спусканюк, А.А. Лядская и др. – К: Техника, 1987. – 216 с.
4. Белошенко В.А. Теория и практика гидроэкструзии / В.А. Белошенко, В.Н. Варюхин, В.З. Спусканюк. – К: Наукова думка, 2007. – 246 с.
5. Калюжний В.Л. Визначення зусилля прямого холодного видавлювання з роздачею прямокутних профілів / В.Л. Калюжний, О.В. Калюжний В.М. Горностай // Обработка материалов давлением: Сборник научных трудов. – Краматорск: ДГМА, 2009 г. – №1 (20). – С. 23–27.
6. Калюжний В.Л. Створення високопродуктивних, ресурсозберігаючих технологій виготовлення холодним об'ємним штампуванням високоточних виробів з пластичних і малопластичних металів / В. Л. Калюжний // Вестник Машиностроение. – К: НТУУ «КПІ», 2010 г. – №60. – С. 19–25.
7. Калюжний В.Л. Прямое холодное выдавливание с раздачей профилей из сталей / В.Л. Калюжний, В.Н. Горностай, А.С. Запороженко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Нові рішення у сучасних технологіях. – Х: НТУ «ХПІ», 2012. – № 47 (953). – С. 110–115.
8. Кузьменко В.И. Влияние контактного трения на характер течения и силовой режим процесса прямого выдавливания с уширением / В.И. Кузьменко, В.Н. Горностай, В.О. Василенко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Нові рішення у сучасних технологіях. – Х: НТУ «ХПІ», 2013. – № 42 (1015). – С. 110–114.

References (transliterated)

1. Kovka y ob'emnaia shtampovka: Spravochnik. V 4-kht. / Red. sovet: E.Y. Semenov (pred.) y dr. . – t.3. Kholodnaia ob'emnaia shtampovka / Pod red. H.A. Navrotskoho. – Moscow: Mashynostroenye, 1987. – 384 p.
2. Teoriya plasticheskikh deformatsiy metallov / E.P. Unkskov, U. Dzhonson, V.L. Kolmogorov i dr.; Pod red. E.P. Unksova / Per. s angl. A.G. Ovchinnikova. – Moscow: Mashinostroenie, 1983. – 598 p.
3. Chernyi Yu.F. Gidropressovanie instrumentalnykh staley / Yu.F. Cherniy, V.Z. Spuskanyuk, A.A. Lyadskaya A.A. i dr. – Kyiv: Tehnika, 1987. – 216 p.
4. Beloshenko V.A. Teoriya i praktika gidroekstruzii / V.A. Beloshenko, V.N. Varyuhin, V.Z. Spuskanyuk. – Kyiv: Naukova dumka, 2007. – 246 p.
5. Kalyuzhnyi V.L. Viznachennya zusillya pryamogo holodnogo vidavlyuvannya z rozdacheyu pryamokutnih profiliv // V.L. Kalyuzhnyi, O.V. Kalyuzhnyi V.M. Gornostay // Obrabotka materialov davleniem: Sbornik nauchnykh trudov. – Kramatorsk: DGMA, 2009 g. – No 1 (20). – P. 23–27.
6. Kalyuzhnyi V.L. Stvorenniya visokoproduktivnih, resursozberigayuchih tehnologiy vigotovlennya holodnim ob'emnim shtampuvannyam visokotochnih virobiv z plastichnih i maloplastichnih metaliv / V. L. Kalyuzhnyi // Vestnik Mashinostroenie. – Kyiv: NTUU «KPI», 2010 g. – No 60. – P. 19–25.
7. Kalyuzhnyi V.L. Pryamoe holodnoe vyidavlivanie s razdachey profiley iz staley / V.L. Kalyuzhnyi, V.N. Gornostay, A.S. Zaporozhchenko // Visnik NTU «HPI». Seriya: Novi rishennya u suchasniy tehnologiyah. – Kharkiv: NTU «HPI», 2012. – No 47 (953). – P. 110–115.
8. Kuzmenko V.I. Vliyanie kontaktного treniya na harakter techeniya i silovoy rezhim protsesa pryamogo vyidavlivaniya s ushireniem / V.I. Kuzmenko, V.N. Gornostay, V.O. Vasilenko // Visnik NTU «HPI». Seriya: Novi rishennya u suchasniy tehnologiyah. – Kharkiv: NTU «HPI», 2013. – No 42 (101). – P. 110–114.

Поступила (received) 03.11.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Прогнозування механічних властивостей здеформованого металу при холодному прямому видавлюванні стержневих виробів по схемі «заготовка за заготовкою» / В.Л. Калюжний, А.М. Потятиник, І.П. Куліков, С.І. Унгуриян // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів машинобудуванні та металургії. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 35 (1257). – С. 14–20. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2519-2671.

Прогнозирование механических свойств сформированного металла при холодном прямом выдавливании стержневых изделий по схеме «заготовка за заготовкой» / В.Л. Калюжний, А.М. Потятиник, И.П. Куликов, С.И. Унгуриян // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів машинобудуванні та металургії. – Х. НТУ «ХПІ», 2017. – № 35 (1257). – С. 14–20. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2519-2671.

Prediction of the deformed metal mechanical properties by cold forward extrusion according core products to the scheme "workpiece behind the workpiece" / V.L. Kaluzhny, V.M. Potjatynyk, I.P. Kulikov, S.I. Ungurjan // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Innovative technologies and equipment of materials processing in engineering and metallurgy. – Kharkov : NTU "KhPI", 2017. – No. 35 (1257). – P. 14–20. – Bibliogr.: 8. – ISSN 2519-2671.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Калюжний Володимир Леонідович – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», професор кафедри механіки пластичності матеріалів та ресурсозберігаючих процесів; тел.: (098) 273-44-19; e-mail: kwl_2011@ukr.net.

Калюжний Владимир Леонидович – доктор технических наук, профессор, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского», профессор кафедры механики пластичности материалов и ресурсосберегающих процессов; тел.: (098) 273-44-19; e-mail: kwl_2011@ukr.net.

Kaluzhnyi Vladimir Leonidovich – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute named Igor Sikorsky", Professor of the Department of Mechanics of the Materials Plasticity and Resource Processes; tel.: (098) 273-44-19; e-mail: kwl_2011@ukr.net.

Потятиник Андрій Миколайович – аспірант кафедри механіки пластичності матеріалів та ресурсозберігаючих процесів, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»; тел.: (067) 337-10-08; e-mail: Qdx@ukr.net.

Потятиник Андрей Николаевич – аспирант кафедры механики пластичности материалов и ресурсосберегающих процессов, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского»; тел.: (067) 337-10-08; Qdx@ukr.net.

Potjatynyk Andrei Nikolaevich – fellowt of the Department of Mechanics of the Materials Plasticity and Resource Processes, National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute named Igor Sikorsky"; tel.: (067) 337-10-08; e-mail: Qdx@ukr.net.

Куліков Іван Петрович – аспірант кафедри механіки пластичності матеріалів та ресурсозберігаючих процесів, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»;тел.: (067) 337-10-08; e-mail: iv8h@gmail.com.

Куликов Иван Петрович – аспирант кафедры механики пластичности материалов и ресурсосберегающих процессов, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского»; тел.: (067) 337-10-08; iv8h@gmail.com

Kulikov Ivan Petrovich – National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute named Igor Sikorsky", postgraduate student of the Department of Mechanics of the Materials Plasticity and Resource Processes; tel.: (067) 337-10-08; e-mail: iv8h@gmail.com.

Унгуриян Сергій Ілліч – магістрант кафедри механіки пластичності матеріалів та ресурсозберігаючих процесів, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»; тел.: (063) 754-79-99; e-mail: ungurjan23@gmail.com.

Унгуриян Сергей Ильич – магистрант кафедры механики пластичности материалов и ресурсосберегающих процессов, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского»; тел.: (063) 754-79-99; ungurjan23@gmail.com/

Ungurjan Sergei Illich – National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute named Igor Sikorsky", postgraduate student of the Department of Mechanics of the Materials Plasticity and Resource Processes; tel.: (063) 754-79-99; e-mail: ungurjan23@gmail.com.

УДК 621.7

Е.С. КЛЕМЕШОВ, В.Л. ЧУХЛЕБ

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ МЕТАЛЛА В ПРОЦЕССЕ КОВКИ
ШАТУННОЙ ШЕЙКИ КОЛЕНЧАТОГО ВАЛА

Технологический процессковки поковок коленчатых валов состоит из множества кузнечных операций и технологических переходов, в связи с чем, отследить влияние каждой операции на качество готовой поковки в целом является сложной задачей. Целью исследования является изучение процесса формоизменения металла при изготовлении поковки коленчатого вала с получением шатунной шейки свободной ковкой, а также определение интервалов рациональных параметров выполнения кузнечных операций процесса свободнойковки. Рассмотрен процесс формоизменения металла при изготовлении поковки коленчатого вала свободной ковкой. На основе результатов исследований определены рациональные геометрические размеры инструмента. Для проведения исследований разработанной технологииковки крупных поковок проведены эксперименты с использованием масштабированных моделей. С использованием компьютерного моделирования найдены интервалы глубины вдавливания бойка в заготовку, а также схема кантовок при протяжке слитка, которая обеспечивает наименьшее искривление заготовки в процессе деформации, а также наиболее равномерную проработку металла коленчатого вала с получением шатунной шейки. Установлено, что изготовление поковки коленчатого вала с получением шатунной шейки ковкой узкими бойками возможно при условии соблюдения необходимых параметров деформации заготовки в процессековки.

Ключевые слова: технология, схемаковки, бойки, коленчатый вал.

Технологічний процес кування поковок колінчастих валів складається з багатьох ковальських операцій і технологічних переходів, в зв'язку з чим, відстежити вплив кожної операції на якість готової поковки в цілому є складним завданням. Метою дослідження є вивчення процесу формозміни металу при виготовленні поковки колінчастого валу з отриманням шатунної шийки вільним куванням, а також визначення інтервалів раціональних параметрів виконання ковальських операцій процесу вільного кування. Розглянуто процес формозміни металу при виготовленні поковки колінчастого валу вільним куванням. На основі результатів досліджень визначені раціональні геометричні розміри інструменту. Для проведення досліджень розробленої технології кування великих поковок проведено експерименти з використанням масштабованих моделей. З використанням комп'ютерного моделювання знайдені інтервали глибини вдвлювання бойка в заготовку, а також схема кантувань при протягуванні злитка, яка забезпечує найменше викривлення заготовки в процесі деформації, а також найбільш рівномірне опрацювання металу колінчастого валу з отриманням шатунної шийки. Встановлено, що виготовлення поковки колінчастого валу з отриманням шатунної шийки куванням вузькими бойками можливо за умови дотримання необхідних параметрів деформації заготовки в процесі кування.

Ключові слова: технологія, схема кування, бойки, колінчастий вал.

The technological process of forging the forgings of crankshafts consists of a multitude of forging operations and technological transitions, therefore, it is difficult to trace the effect of each operation on the quality of the finished forging. The purpose of the study is to study the process of metal shaping during the manufacture of the forging of the crankshaft to produce a crankpin with free forging, and also to determine the intervals for the rational parameters for performing forging operations of the free forging process. The process of metal shaping during the manufacture of the forging of the crankshaft by free forging is considered. On the basis of the research results, rational geometric dimensions of the instrument are determined. To conduct research on the developed technology for forging large forgings, experiments were performed using scaled models. With the use of computer modeling, intervals were found for the depth of the striker pressing into the workpiece, as well as the cantilever scheme for broaching the ingot, which ensures the least curvature of the workpiece during deformation, as well as the most uniform processing of the crankshaft metal to produce a crankpin. It is established that the manufacture of the forging of the crankshaft with the production of a crank pin by forging with narrow strikers is possible provided that the necessary parameters of deformation of the billet during the forging process are observed.

Keywords: technology, forging scheme, dies, crankshaft.

Вступление. Разработка ресурсосберегающих технологийковки является важной задачей. В этом направлении зачастую работают с группой поковок, имеющих наибольшую трудоёмкость при изготовлении, а также ввиду применения напусков на отдельные части поковок из-за невозможности их выполнения. К данной группе поковок относятся поковки коленчатых валов. При получении такой поковки, большая часть изделия закрывается напуском в части колена вала и при механической обработке этот металл идет в отход. Удаление металла из коренной части вала способствует ухудшению эксплуатационных характеристик изделия, ввиду перерезания волокон металла при механической обработке поковки.

Анализ последних исследований и публикаций. Технологический процессковки поковок коленчатых валов состоит из множества

кузнечных операций и технологических переходов [1]. При этом отследить влияние каждой операцииковки от самого начала на качество готовой поковки в целом является трудной задачей. В [2] приводится классификация трудоёмкости выполнения формы поковки, в которой поковки коленчатых валов относятся к наиболее сложным поковкам. Для большинства коленчатых валов стационарных, судовых и тепловозных дизелей чаще всего применяют легированные марки стали, такие как 40Х, 40ХН, 35ХМ, 30ХН2МА, 18Х2Н4МА и т.д. [3].

Важным этапом в процессековки коленчатых валов, влияющем на механические свойства поковки, является этап подготовки заготовки. Этот этап включает в себя билетировку слитка, осадку и протяжку до размеров заготовки для последующейковки [4]. Именно эти две операцииковки, а именно осадка и протяжка, коренным образом влияют на качество изготавливаемых поковок. В частности, для

осадки, основними параметрами, которые влияют на степень проработки металла, что в свою очередь влияет на качество готовой продукции, являются: 1) фактор формы заготовки (h/D); 2) степень деформации (ϵ); 3) скорость деформации ($\dot{\epsilon}$). Для операции протяжки основными параметрами процесса являются: 1) величина подачи; 2) степень единичного обжатия; 3) фактор формы заготовки; 4) способ приложения деформирующей силы (схемы кантовок).

Авторами [5] были проведены эксперименты при помощи компьютерного моделирования и его результаты позволяют определить влияние таких параметров заготовки, как фактор формы (h/D) и степень деформации (ϵ) на неравномерность распределения деформации в металле при выполнении операции осадки слитка с последующей протяжкой на круглое сечение. Схема кантовок при протяжке слитка, которая обеспечивает наименьшее искривление заготовки в процессе деформации, а также наиболее равномерную проработку металла, обоснована в исследовании [6]. Ввиду всех вышеперечисленных особенностей технологии изготовления поковок коленчатых валов, была разработана усовершенствованная технологическая схемаковки, которая позволяет направить волокна металла по форме колена, а также снизить расход металла при механической обработке.

Постановка задачи. Главной целью данного исследования является изучение процесса формоизменения металла при изготовлении поковки коленчатого вала с получением шатунной шейки свободной ковкой, а также определения интервалов рациональных параметров выполнения кузнечных операций процесса свободнойковки.

Для проведения исследования разработанной технологииковки крупных поковок проводят эксперименты с использованием масштабированных моделей или же ряд экспериментов с помощью компьютерного моделирования процесса.

На основе анализа технологических схем производства поковок коленчатых валов, была выбрана заготовка под последующуюковку, которая представляет собой гладкий вал. Геометрические размеры заготовки были выбраны согласно объему заготовки в реальном процессековки коленчатого вала, с учетом масштаба эксперимента. Длина цилиндра была выбрана из расчета изготовления однойковки. Поэтому заготовкой являлся цилиндр с диаметром 40 мм и длиной 80 мм. В качестве

материала заготовки для эксперимента использовалась легированная сталь 40ХН2МА. Характерным интервалом температурковки для данной марки стали является интервал от 1250°C до 950°C. Также, для обеспечения меньшего остывания заготовки в процессековки, было принято решение использовать бойки, подогретые до 300°C. Для деформации заготовки были использованы осадочная плита и верхний боёк толщиной 8 мм – на первом этапековки (при вдавливании узкого бойка), и пара узких бойков толщиной 8 мм – на втором этапековки (при последующих обжатиях и кантовках заготовки). Оптимальная глубина внедрения узкого бойка составляла 0,45...0,5 от диаметра заготовки, что составляет 20 мм. Для компьютерного моделирования процесса деформации была использована программа QForm V8.

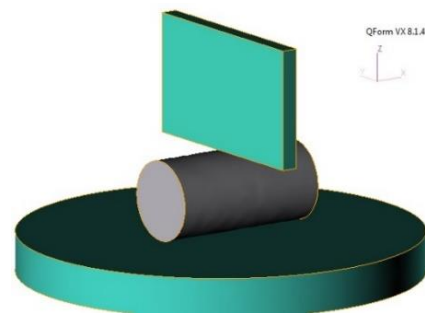


Рис. 1 – 3D модель заготовки и деформирующего инструмента в программе QForm V8

Процесс деформации проходит следующим образом (рис. 2). В заготовку, которая находится на осадочной плите, вдавливается узкий боёк (рис. 2, а) на глубину 20 мм, после чего заготовку кантуют на 90° (рис. 2, б), а осадочную плиту заменяют на узкий боёк. После этого заготовка обжимается бойками и снова кантуется на 90° (рис. 2, в). Данная серия кантовок повторяется несколько раз, пока шейка поковки в сечении не приобретает форму квадрата. Далее происходитковка шейки с квадратного сечения на восьмигранник путем кантовок на 45° с последующим обжатием и кантовки на 90° с последующим обжатием, а затем на круглое сечение с помощью нескольких обжатий с последующими кантовками на малый угол (до 15°).

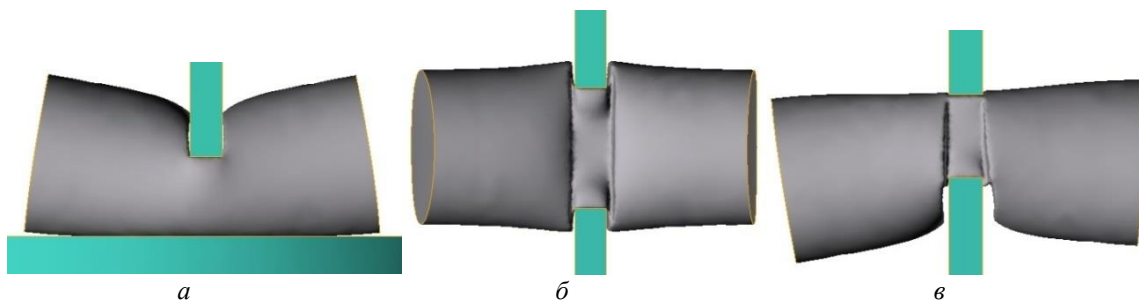


Рис. 2 – Процесс деформации заготовки узкими бойками при получении шатунной шейки коленчатого вала свободной ковкой по разработанной технологии: а – на первом этапековки; б – обжатие после кантовки на 90°, г, в – заготовка после одной серии обжатий и кантовок

В результате компьютерного моделирования в программе QForm V8 были получены поковки, которые показаны на рис. 3. Поковки, полученные по разработанной схемековки, отличаются достаточно высокими показателями прямолинейности, а также достаточно точным соблюдением размеров шатунной шейки коленчатого вала, а именно диаметра и длины.

При этом замечено, что глубина внедрения бойка в заготовку не должна превышать 50% от её диаметра, ввиду чрезмерно сильного искривления, которое в последующем трудно устранимо. Также, эта величина не должна быть меньше 20%, так как в таком случае данная схема становится не эффективной.

Толщина узких бойков так же имеет сильное влияние на формоизменение поковки. В данном случае, имеется ввиду возможность получения шатунной шейки необходимой длины как таковой. При повышении толщины бойка свыше 50% от длины шатунной шейки, возможно сильное отклонение её длины в готовом изделии, что по сути является браком. Снижение толщины бойка меньше 50% от длины шатунной шейки приводит к неэффективности данной схемы, ввиду увеличения количества металла, удаляемого механической обработкой.

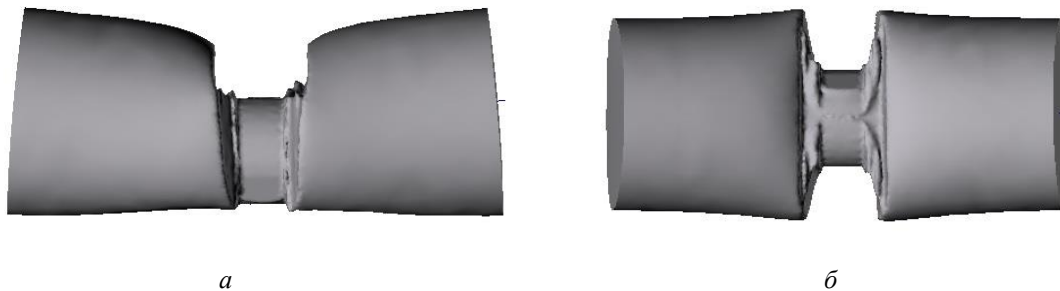


Рис. 3 – Поковки коленчатого вала с откованной шатунной шейкой по разработанной технологии
а – вид заготовки сбоку; б – вид заготовки сверху

Из рис. 2 и рис. 3 видно, что изготовление поковки коленчатого вала с получением шатунной шейки ковкой узкими бойками возможно, но при условии соблюдения необходимых параметров деформации заготовки в процессековки.

Выводы:

1) В результате анализа технологических схем производства поволовок коленчатых валов была создана обобщенная схемаковки. На основе анализа недостатков данной схемы была разработана усовершенствованная технологияковки коленчатого вала с получением шатунной шейки, которая в существующей схемековки закрывается кузнечным напуском.

2) По результатам проведенного компьютерного моделирования процессаковки шатунной шейки по разработанной технологии были определены рациональные деформационные параметры: глубина внедрения бойка в заготовку должна находиться в интервале 0,2..0,5 от диаметра заготовки, а толщина бойков составлять 0,45..0,5 от длины шатунной шейки коленчатого вала.

Список литературы

1. Кальченко П.П. Новые технологические процессыковки крупных прессовых поволовок: монография / П.П. Кальченко, О.Е. Марков – Краматорск : ДГМА, 2014. – 100 с.
2. Охрименко Я.М. Технология кузнечно-штамповочного производства. Учебник для вузов. Изд. 2-е, перераб. и доп. М; Машиностроение, 1976 – 560 с.
3. Беспалов Б.Л. Технология машиностроения (специальная часть) / Б.Л. Беспалов, Л.А. Глейзер, И.М. Колесов, Н.Г. Латышев,

С.Н. Соловьев, В.А. Тимирязев, Д.В. Чарнко.–М., «Машиностроение», 1973. – 448 с.

4. Гринкевич В.А. Теоретические исследования кузнечной операции протяжки при использовании схемы деформации «проходами» / В.А. Гринкевич, В.Л. Чухлеб, Г. Банашек, А.В. Ашкелянец // Вестник НТУ «ХПИ». 2014. №44. – С. 28–34.
5. Чухлеб В.Л. Аналіз впливу параметрів попередньої осадки та її відсутності на нерівномірність деформації при протяжці поволовок з титанових сплавів / В.Л. Чухлеб, Є.С. Клемешов, В.О. Гринкевич, Х. Дия // Вестник НТУ «ХПИ». 2015. №47. С. 82–85.
6. Чухлеб В.Л. Дослідження напружено-деформованого стану при протяжці титанового сплаву з метою оптимізації параметрів кування / В.Л. Чухлеб, Є.С. Клемешов, В.О. Гринкевич, Х. Дия // Вестник НТУ «ХПИ». 2015. №24. С. 159–166.

References (transliterated)

1. Kal'chenko P.P. Novye tehnologicheskie processy kovki krupnykh pressovykh pokovok: monografiya / P.P. Kal'chenko, O.E. Markov – Kramatorsk : DGMA, 2014. – 100 p.
2. Oхrimenko Ya.M. Tehnologiya kuznechno-shtampovochnoho proizvodstva. Uchebnik dlja vuzov. Izd. 2-e, pererab. i dop. Moscow; Mashinostroenie, 1976 – 560 p.
3. Bespalov B.L. Tehnologija mashinostroenija (special'naja chast') / B.L. Bespalov, L.A. Glejzer, I.M. Kolesov, N.G. Latyshev, S.N. Solov'ev, V.A. Timirjazez, D.V. Charnko. – Moscow, «Mashinostroenie», 1973. – 448 p.
4. Grinkevich V.A. Teoreticheskie issledovaniya kuznechnoj operacii protjazhki pri ispol'zovanii shemy deformacii «prohodami» / V.A. Grinkevich, V.L. Chuhleb, G. Banashek, A.V. Ashkeljanec // Vestnik NTU «HPI». 2014. No44. – P. 28–34.
5. Chukhlib V.L. Analiz vplyvu parametriv poperedn'oyi osadky ta yiyi vidсутності na nerivnomirnist' deformatsiyi pry protyazhtsi pokovok z tytanovykh splaviv / V.L. Chukhlib, Ye.S. Klemeshov, V.O. Hrynkevych, Kh. Dyya // Vestnyk NTU «KhPY». 2015. No47. – P. 82–85.
6. Chukhlib V.L. Doslidzhennya napruzheno-deformovanoho stanu pry protyazhtsi tytanovoho splavu z metoyu optymizatsiyi parametriv kuvannya / V.L. Chukhlib, Ye.S. Klemeshov, V.O. Hrynkevych, Kh. Dyya // Vestnyk NTU «KhPY». 2015. No24. – P. 159–166

Поступила (received) 28.11.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Дослідження формозміни металу в процесі кування шатунної шийки колінчастого валу/ Є. С. Клемешов, В. Л. Чухліб // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 35 (1257). – С. 21–24. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2519-2671.

Исследование формоизменения металла в процессековки шатунной шейки коленчатого вала/ Е. С. Клемешов, В. Л. Чухлеб // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 35 (1257). – С. 21–24. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2519-2671.

The study of metal deformation during the forging process of the connecting rod of crankshaft/ E. S. Klemeshov, V. L. Chukhleb // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Innovative technologies and equipment of materials processing in engineering and metallurgy. – Kharkov : NTU "KhPI", 2017. – No. 35 (1257). – P. 21–24. – Bibliogr.: 6. – ISSN 2519-2671.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Клемешов Євген Сергійович – аспірант кафедри обробки металів тиском ім. акад. Чекмарьова О.П., м. Дніпро; e-mail: klemeshov.evgen@gmail.com

Клемешов Евгений Сергеевич – аспірант кафедри обробки металів тиском ім. акад. Чекмарьова А.П., г. Дніпро; e-mail: klemeshov.evgen@gmail.com

Klemeshov Yevhen Sergijovich – Ph.D. student, National Metallurgical Academy of Ukraine, e-mail: klemeshov.evgen@gmail.com

Чухліб Віталій Леонідович – доктор технічних наук, професор кафедри обробки металів тиском ім. акад. Чекмарьова О.П., м. Дніпро; тел.: (095) 792-55-92; e-mail: chuhleb@metal-forming.org

Чухлеб Виталий Леонидович – доктор технічних наук, професор кафедри обробки металів тиском ім. акад. Чекмарьова А.П., г. Дніпро; тел.: (095) 792-55-92; e-mail: chuhleb@metal-forming.org

Chukhlib Vitaliy Leonidovich – Doctor of technical sciences, National Metallurgical Academy of Ukraine, Professor at the Department of Metal Forming; tel.: (095) 792-55-92; e-mail: chuhleb@metal-forming.org

УДК 621.73.046

М. С. КОСІЛОВ, О. Є. МАРКОВ, О. В. ГЕРАСИМЕНКО, С. О. ШЕВЦОВ

МОДЕЛЮВАННЯ ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ СХІДЧАСТИХ
ПУСТОТІЛИХ ПОКОВОК В ПРОЦЕСІ РОЗКОЧУВАННЯ

В роботі описані результати дослідження отримання східчастої поковки. Дослідження були проведені шляхом виконання експерименту на свинцевих моделях. Встановлено, що через різну товщину стінки виступу та уступу заготовки, ступінь деформації уступу більший ніж виступу. Через це утворюється конусна форма поковки. В залежності від відносного діаметру виступу напрям конусності заготовки змінюється. Зміна конусності відбувається в процесі одночасного деформування виступу та уступу, через більшу тангенціальну деформацію уступу.

Ключові слова: поковка, деформація, конусність, бойок, розкочування, східчаста поковка, обтискання.

В работе описаны результаты исследования получения ступенчатой поковки. Исследования были проведены путем выполнения эксперимента на свинцовых моделях. Установлено, что из-за разной толщины стенки выступа и уступа заготовки, степень деформации уступа больше, чем выступа. Из-за этого образуется конусная форма поковки. В зависимости от относительного диаметра выступа направление конусности заготовки меняется. Изменение конусности происходит при одновременном деформировании выступа и уступа из-за большей тангенциальной деформации уступа.

Ключевые слова: поковка, деформация, конусность, боек, раскатка, ступенчатая поковка, обжатие.

This paper describes the results of a study to obtain step forgings. It is known that in order to provide greater safety and increase the life of the reactor unit, it is necessary to produce complex elements of the body, which combine several simple ones. The study the shape and deformation of stepped hollow forgings during rolling is the purpose of the work. The study was conducted by the experiment on the lead models. Adding 1% antimony to lead has allowed approximating the mechanical characteristics of the model material to the properties of steel 34HNM in hot condition. The research was conducted in a laboratory environment on a hydraulic press. During the gradual rolling of the flange and the flange with the ledge the difference between the total deformations for the ledge and the protuberance decreases when the rolling the ledge is started. The parameters of taper and total deformation are chosen for setting the shape change. Due to different thickness of the flange wall and the ledge wall of the workpiece, the strain degree of the ledge is greater than the flange is established. This also leads to large total deformations in the workpiece. Consequently, a conical form of forging is formed by enlarging. Depending on the relative diameter of the flange, taper direction of the workpiece changes. Changing the taper occurs while simultaneously deforming the flange and the ledge due to a large tangential deformation of the ledge.

Keywords: forging, deformation, taper, die, enlarging, step forging, reduction.

Вступ. Для швидкого обслуговування і ремонту, підвищення строку експлуатації реакторного блоку, особлива увага приділяється зменшенню кількості його складових. З цього приводу виникає потреба у створенні суміщених елементів, які поєднують в собі декілька деталей [1, 2].

Аналіз стану питання. На сьогодні більшість вузлів реакторного блоку зі змінюваним поперечним перерізом виготовляються за допомогою зварювання окремих деталей. Це ускладнює виробництво, збільшує час виготовлення, обмежує термін експлуатації вузла і, як наслідок, усього реактора. Цей недолік можна виправити за допомогою кування поковок, які поєднували в собі декілька деталей. Однак при подальшій обробці відбувалися значні втрати металу, великий об'єм якого видаляється механічно, а це означає, що значна його кількість потрапляє у відходи. Через значний об'єм металу, який потрібно видалити, відбувається швидкий знос ріжучого інструменту. Також мають місце значні нормо-години, які йдуть на механічну обробку. Це призводить до збільшення собівартості [3] виготовлення елементів реакторного блоку, які мають складний профіль.

Аналіз літератури. Обичайки отримують як із звичайних злитків, так і з пустотілих [2, 3]. Аналіз способів виготовлення таких поковок дозволив встановити, що вже є значний досвід застосування обох типів злитків. Необхідна форма поковки виходить, як за рахунок особливої форми заготовки, так і за рахунок застосування профільованих бойків, які наближають

форму поковки до форми потрібної деталі. З аналізу літературних джерел було встановлено, що найбільш затребувані деталі конусної, сферичної і ступінчастої форми [2, 5–9].

Мета роботи – дослідження формозміни та деформованого стану східчастих пустотілих поковок під час розкочування.

Метод дослідження. Для проведення дослідження виготовлялися свинцеві заготовки з відносним діаметром з боку уступу $D_y^{zag} / d_{cp}^{zag} = 1,85$ та відносними діаметрами з боку виступу $D_b^{zag} / d_{cp}^{zag} = 2,5; 2,4; 2,3$

(рис. 1, а–в). Температура рекристалізації свинцю $\approx 25^\circ\text{C}$. Додавання в свинець 1% сурми дозволило наблизити механічні характеристики модельного матеріалу до властивостей сталі 34ХНМ в гарячому стані [10]. Для розкочування використовувався східчастий бойок (рис. 1, г) та дорн $\varnothing 30$ мм.

Дослідження були проведені в лабораторних умовах на гідравлічному пресі BLELL K-G номінальним зусиллям 100 кН (швидкість робочого ходу 200 мм/хв).

Результати експерименту. На рисунку 2 зображені поковки отримані після розкочування східчастих пустотілих заготовок з відносним діаметром уступу заготовки $D_y^{zag} / d_{cp}^{zag} = 1,85$. В результаті розкочування найменшу конусність мала

поковка, яка була отримана із заготовки з відносним діаметром виступу D_6^{3a2}/d_{cp}^{3a2} рівним 2,5, а найбільшу з

$$D_6^{3a2}/d_{cp}^{3a2} = 2,3.$$

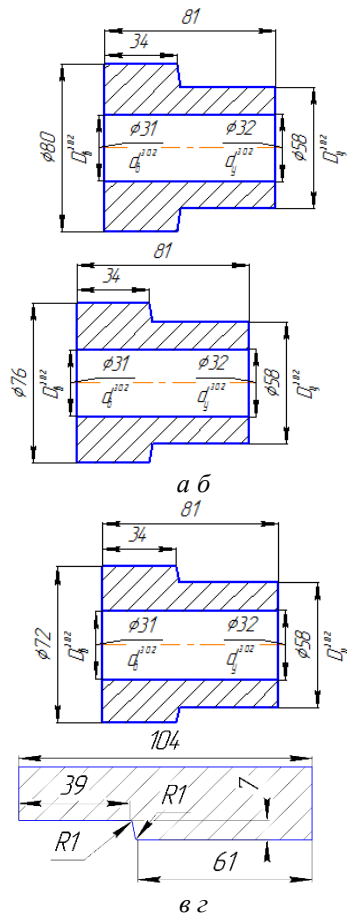


Рис. 1 – Розміри: а–в – заготовки та г – ескіз бойка для проведення дослідження

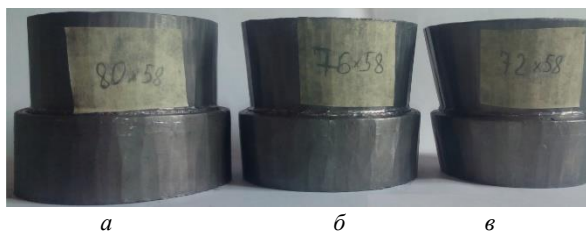


Рис. 2 – Зразки отримані після розкочування заготовок

для відносного діаметру заготовки $D_y^{3a2}/d_{cp}^{3a2} = 1,85$:

$$а - D_6^{3a2}/d_{cp}^{3a2} = 2,5; б - D_6^{3a2}/d_{cp}^{3a2} = 2,4; в - D_6^{3a2}/d_{cp}^{3a2} = 2,3$$

Аналіз отриманих результатів накопиченої деформації виступу та уступу в залежності від обтискань (рис. 3), дозволяє виявити, що зі збільшенням обтискання заготовки виникає збільшення сумарної деформації металу виступу та уступу по параболічній закономірності. Однак у

випадку $D_6^{3a2}/d_{cp}^{3a2} = 2,5$ (рис. 3, а) сумарна деформація металу виступу більша за величиною ніж деформація уступу, але при цьому інтенсивніше збільшується сумарна деформація уступу. Різниця між сумарними деформаціями для уступу та виступу зменшується і, як наслідок, стає найменшою для всіх зразків. Що в свою чергу призводить до найменшої різниці між відносними діаметрами отвору з боку виступу та уступу.

$$У випадку $D_6^{3a2}/d_{cp}^{3a2} = 2,4$ (рис. 3, б) сумарна$$

деформація металу уступу більша за величиною ніж виступу. Розходження між сумарними деформаціями для уступу та виступу зменшується коли починається обтискання уступу. Інтенсивніше накопичення деформацій уступу призводить до того, що сумарна деформація уступу починає перевищувати сумарну деформацію виступу і як наслідок відносний діаметр отвору з боку уступу стає більшим ніж з боку виступу.

$$У випадку $D_6^{3a2}/d_{cp}^{3a2} = 2,3$ (рис. 3, в) сумарна$$

деформація металу уступу більша за величиною ніж деформація виступу, так як і в попередньому випадку. Однак сумарна деформація уступу зростає одразу, тому що виступ і уступ деформуються одночасно з першого ж натискання.

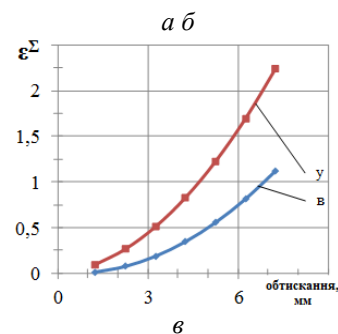
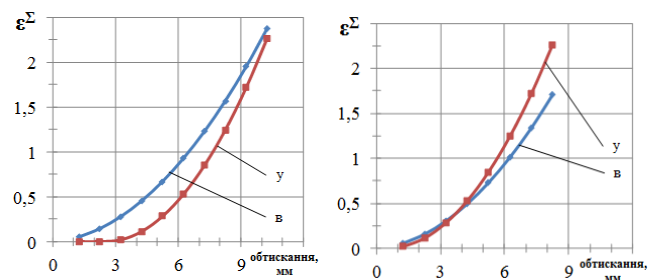


Рис. 3 – Графічні закономірності накопиченої деформації від обтискання для виступу та уступу для відносного діаметру заготовки $D_y^{3a2}/d_{cp}^{3a2} = 1,85$:

$$а - D_6^{3a2}/d_{cp}^{3a2} = 2,5; б - D_6^{3a2}/d_{cp}^{3a2} = 2,4; в - D_6^{3a2}/d_{cp}^{3a2} = 2,3$$

Зростання сумарної деформації уступу призводить до збільшення відносного діаметра з боку уступу. Для усіх трьох випадків при одночасному обтисканні

виступу та уступу на однакову абсолютну величину більш інтенсивніше збільшується діаметр з боку уступу. Це пояснюється різною ступеню деформації металу виступу та уступу через різну товщину стінки. Як результат, уступ деформується більше, так як тангенціальна деформація металу в уступі більша. Більша тангенціальна деформація металу уступу призводить до зменшення різниці між відносними діаметрами отвору з боку виступу та уступу та, як наслідок, до зменшення конусності поковки – при $D_6^{3ag}/d_{cp}^{3ag} = 2,5$. При $D_6^{3ag}/d_{cp}^{3ag} = 2,4$ через більшу

тангенціальну деформацію металу збільшується різниця між діаметрами отвору на початковій стадії розкочування за рахунок деформування виступу, в подальшому ця різниця зменшується, потім знову збільшується за рахунок деформування уступу, як наслідок змінюється напрям конусності. При $D_6^{3ag}/d_{cp}^{3ag} =$

2,3 більша тангенціальна деформація металу призводить до збільшення різниці між відносними діаметрами отвору з боку виступу та уступу та, як наслідок, до збільшення конусності поковки. Отже для співвідношення розмірів уступу заготовки $D_y^{3ag}/d_{cp}^{3ag} = 1,85$ необхідно прагнути до співвідношення розмірів виступу $D_6^{3ag}/d_{cp}^{3ag} = 2,5$ при $\epsilon = 0,42$, та $D_6^{3ag}/d_{cp}^{3ag} = 2,4$ при $\epsilon = 0,3$, для яких різниця між діаметрами найменша.

Різницю між діаметрами поковки з боку виступу та уступу можна оцінити одним показником – конусність поковки. Конусність поковки розраховувалася за наступною формулою

$$K_{пок} = \frac{|d_6^{пок} - d_y^{пок}|}{L^{пок}}, \quad (1)$$

де $d_6^{пок}$ – торцевий внутрішній діаметр поковки зі сторони виступу;

$d_y^{пок}$ – торцевий внутрішній діаметр поковки зі сторони уступу;

$L^{пок}$ – довжина.

Аналіз отриманих результатів конусності поковки від ступеня деформації ϵ (рис. 4) дозволив встановити, що для відносного діаметру заготовки $D_y^{3ag}/d_{cp}^{3ag} = 1,85$ зі збільшенням ступеня деформації конусність поковки має змінний характер. При $D_6^{3ag}/d_{cp}^{3ag} = 2,5$ на початковому етапі конусність збільшується, що пов'язано з деформуванням виступу. Потім конусність має постійне значення, що свідчить про рівномірне збільшення діаметру отвору з боку уступу та виступу. Подальше зниження кривої 1 пов'язане з більш інтенсивним зростанням діаметру отвору з боку уступу.

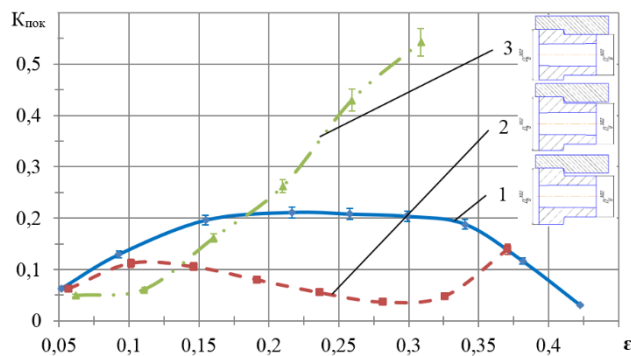


Рис. 4 – Графічні закономірності конусності від ступеня деформування для відносного діаметру заготовки

$$D_y^{3ag}/d_{cp}^{3ag} = 1,85 \text{ при}$$

$$1 - D_6^{3ag}/d_{cp}^{3ag} = 2,5; 2 - D_6^{3ag}/d_{cp}^{3ag} = 2,4; 3 - D_6^{3ag}/d_{cp}^{3ag} = 2,3$$

При $D_6^{3ag}/d_{cp}^{3ag} = 2,4$ на початковому етапі конусність

збільшується, що пов'язано з деформуванням виступу. Поступове зниження пов'язане з деформуванням уступу та більш інтенсивним зростанням діаметру отвору з боку уступу. Інтенсивніше зростання діаметру отвору з боку уступу призводить до того, що при ступені деформації $\epsilon = 0,3$ він починає перевищувати діаметр отвору з боку виступу і конусність знову починає зростати. При $D_6^{3ag}/d_{cp}^{3ag} = 2,3$ конусність одразу починає збільшуватися, що пов'язано з одночасним розкочуванням виступу та уступу. Інтенсивніше зростання діаметру з боку уступу пов'язане з тим, що тонка стінка уступу отримує більшу ступінь деформації в порівнянні з стінкою виступу при однаковій абсолютній величині деформування.

Висновки. При розкочуванні східчастих пустотілих заготовок з співвідношенням діаметра уступу $D_y^{3ag}/d_{cp}^{3ag} = 1,85$ зі збільшенням ступеня

деформації конусність має змінний характер у випадках коли на початковій стадії деформується лише виступ, а саме при D_6^{3ag}/d_{cp}^{3ag} рівному 2,5 та 2,4.

Зміна конусності відбувається під час одночасного розкочування виступу та уступу через більшу тангенціальну деформацію уступу. Більша тангенціальна деформація уступу призводить до збільшення конусності при D_6^{3ag}/d_{cp}^{3ag} рівному 2,3

починаючи з початкової стадії розкочування, через одночасне деформування виступу та уступу.

Список літератури

1. Current steel forgings and their properties for steam generator of nuclear power plant / Suzuki K., Sato I., Kusuhashi M., Tsukada H. // *Nuclear engineering and design* – 2000 – №198 – p. 15-23 – [https://doi.org/10.1016/S0029-5493\(99\)00273-3](https://doi.org/10.1016/S0029-5493(99)00273-3).
2. Ingersoll D. T. Small modular reactors (SMRs) for producing nuclear energy: international developments / D. Ingersoll // *Handbook of Small Modular Nuclear Reactors*. – 2015. – №1. – P. 27–60. – <https://doi.org/10.1533/9780857098535.1.27>.
3. Zhibankov I. G. (2014). Rational Parameters of Profiled Workpieces for an Upsetting Process / I. G. Zhibankov, O. E. Markov, A. V. Perig // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 71(5–8), 865 – 872. – <https://doi.org/10.1007/s00170-014-5727-5>.
4. Tomlinson M. The development of hollow ingot technology at Sheffield Forgemasters International Ltd. / Tomlinson M., Talamantes-Silva J., Davies P. // *18th International Forgemasters Meeting – Pittsburgh : Market and Technical Proceedings* – 2011 – P. 175-178
5. Lee S. U. Effect of deformation and heat treatment on fabrication of large sized ring by mandrel forging of hollow ingot / Lee S. U., Lee Y. S., Moon Y. H. // *Materials Research Innovations* – 2011 – №1 – P. 458-462 – <http://dx.doi.org/10.1179/143307511X12858957675750>
6. Suzuki K. Manufacturing and material properties of ultralarge size forgings for advanced BWRPV / K. Suzuki, I. Sato, H. Tsukada // *Nuclear Engineering and Design* – №151 – 1994 – P. 513-522 – [https://doi.org/10.1016/0029-5493\(94\)90192-9](https://doi.org/10.1016/0029-5493(94)90192-9)
7. Пат. 106717 Україна, МПК (2006.01) В 21 J 1/04. Спосіб виготовлення порожнистих сферичних поковок / Кальченко П. П.; Марков О. Є.; Руденко Н. О.; заявник та власник патенту Донбаська Державна Машинобудівна Академія. – № u201508943; заявл. 16.09.2015; опубл. 10.05.2016, бюл. № 9. – 3 с.
8. Talamantes-Silva J. Developed of forgings in Sa508-4N for the nuclear industry / J. Talamantes-Silva, M. Kearney, P. Bates // *18th International Forgemasters Meeting – Pittsburgh : Market and Technical Proceedings* – 2011 – P. 234 – 237
9. Development of Mono-bloc Forging for CAP1400 Reactor Pressure Vessel / [W. Bao-zhong, L. Kai-quan, L. Ying та ін.]. // *19th International Forgemasters Meeting* – 2014 – P. 391 – 396
10. Алиев, И. С. Исследование процессовковки бойками выпуклой геометрии с интенсивными пластическими деформациями / И. С. Алиев, М. А. Маркова, В. Н. Злыгоров / *Вісник НТУУ «КПІ»*. Секція машинобудування. – 2015. – № 75 – С. 125–130. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/VKPI_mash_2015_3_19

References (transliterated)

1. Suzuki K., Sato I., Kusuhashi M. and Tsukada H. (2000). Current steel forgings and their properties for steam generator of nuclear power plant. *Nuclear engineering and design* . 198 (1-2), 15-23. – [https://doi.org/10.1016/S0029-5493\(99\)00273-3](https://doi.org/10.1016/S0029-5493(99)00273-3).
2. Ingersoll, D. (2015). Small modular reactors (SMRs) for producing nuclear energy: international developments. *Handbook of small modular nuclear reactors*. 536 (1), 27-60. – <https://doi.org/10.1533/9780857098535.1.27>.
3. Zhibankov I. G., Markov O. E. and Perig A. V.. (2014). Rational parameters of profiled workpieces . *International journal of advanced manufacturing technology*. 72 (5-8), 865-872. – <https://doi.org/10.1007/s00170-014-5727-5>
4. Tomlinson M., Talamantes-Silva J. and Davies P. (2011). The development of hollow ingot technology at Sheffield Forgemasters International Ltd. *18th International Forgemasters Meeting. Pittsburgh : Market and Technical Proceedings*, pp. 175-178
5. Lee S-U., Lee Y-S. and Moon Y-H.. (2011). Effect of deformation and heat treatment on fabrication of large sized ring by mandrel forging of hollow ingot. *Materials Research Innovations*. 15 (1), 458-462. – <http://dx.doi.org/10.1179/143307511X12858957675750>.
6. Suzuki K., Sato I. and Tsukada H.. (2000). Manufacturing and material properties of ultralarge size forgings for advanced BWRPV. *Nuclear Engineering and Design* . 151 (201), 513-522. – [https://doi.org/10.1016/0029-5493\(94\)90192-9](https://doi.org/10.1016/0029-5493(94)90192-9)
7. Kalchenko P. P., Markov O. Ye., Rudenko N. O. Sposib виготовлення порожнистих сферичних поковок [Method of manufacturing hollow spherical forgings]. Patent Ukraine, no u201508943, 2016
8. Talamantes-Silva J., Kearney M. and Bates P. (2011). Developed of forgings in Sa508-4N for the nuclear industry. *18th International Forgemasters Meeting. Pittsburgh: Market and Technical Proceedings*, pp.234 – 237.
9. Bao-zhong W., Kai-quan L., Ying L., Wen-hui Z and De-li Z. (2014). Development of Mono-bloc Forging for CAP1400 Reactor Pressure Vessel. *19th International Forgemasters Meeting. Makhari* — pp. 391 – 396
10. Aliev I. S., Markova M. A. and Zlygorev V. N.. (2015). Issledovanie protsessov kovki boykami vyipukloy geometrii s intensivnyimi plasticheskimi deformatsiyami [Investigation of forging processes by bumps of convex geometry with intense plastic deformation]. *Visnik NTUU «KPI»*. Sektsiya mashinobuduvannya. 1 (75), 125-130. – Available at: http://nbuv.gov.ua/UJRN/VKPI_mash_2015_3_19

Надійшла (received) 20.10.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Модельовання деформованого стану східчастих пустотілих поковок в процесі розкочування / М. С. Косілов, О. Є. Марков, О. В. Герасименко, С. О. Шевцов // *Вісник НТУ «ХПІ»*. Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 35 (1257). – С. 25–29. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2519-2671.

Моделирование деформированного состояния ступенчатых пустотелых поковок в процессе раскатки / М. С. Косилов, А. Е. Марков, А. В. Герасименко, С. А. Шевцов // *Вісник НТУ «ХПІ»*. Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 35 (12587). – С. 25–29. – Библиогр.: 10 назв. – ISSN 2519-2671.

Modeling of the deformed state of stepped hollow forgings in the process of enlarging / M. S. Kosilov, O. E. Markov, O. V. Gerasimenko, S. O. Shevtsov // *Bulletin of NTU "KhPI"*. Series: Innovative technologies and equipment of materials processing in engineering and metallurgy. – Kharkov : NTU "KhPI", 2017. – No. 35 (1257). – P. 25–29. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2519-2671.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Косілов Максим Сергійович – аспірант, Донбаська державна машинобудівна академія, аспірант кафедри «Механіка пластичного формування» м. Краматорськ; тел.: (095) 705 37 10; e mail: kosilovmaksims@gmail.com.

Косилов Максим Сергеевич – аспірант, Донбасская государственная машиностроительная академия, аспірант кафедри «Механика пластического формирования» г. Краматорск; тел.: (095) 705 37 10; e mail: kosilovmaksims@gmail.com.

Kosilov Maxim Serhiyovych – postgraduate student, Donbas state machine-building academy, postgraduate student at the department of "Mechanics of plastic formation", Kramatorsk; tel.: (095) 705 37 10; e mail: kosilovmaksims@gmail.com.

Марков Олег Євгенович – доктор технічних наук, професор, Донбаська державна машинобудівна академія, завідувач кафедри «Механіка пластичного формування», м. Краматорськ; тел.: (050) 220 85 82; e mail: oleg.markov.ond@gmail.com.

Марков Олег Евгеньевич – доктор технических наук, профессор, Донбасская государственная машиностроительная академия, заведующий кафедрой «Механика пластического формирования», г. Краматорск тел.: (050) 220 85 82; e mail: oleg.markov.ond@gmail.com.

Markov Oleg Evgenovich – doctor of technical sciences, Full Professor, Donbas state machine-building academy, head of the department of "Mechanics of plastic formation", Kramatorsk; tel.: (050) 220 85 82; e mail: oleg.markov.ond@gmail.com.

Герасименко Олексій Васильович – заступник директора ТОВ ТПК "Профальянс".

Герасименко Алексей Васильевич – заместитель директора ООО ТПК "Профальянс".

Gerasimenko Oleksiy Vasyliovych – deputy director of Ltd. TPC "Profalyans".

Шевцов Сергій Олександрович – старший викладач кафедри «Вищої математики», Донбаська державна машинобудівна академія, г. Краматорск.

Шевцов Сергей Александрович – старший преподаватель кафедры «Высшей математики», Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск.

Shevtsov Sergey Aleksandrovich – senior lecturer of the department of "Higher mathematics", Donbas state machine-building academy, Kramatorsk

УДК 621.7.044.7

М.В. КРАЕВ, В.С. КРАЕВА

РАЗДАЧА ТРУБЧАТЫХ ЗАГОТОВОК В ПОСТОЯННОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Наведено результати штампування роздачею в постійному магнітному полі індукцією до 1,15 Тл трубчастих циліндричних заготовок з аустенітної сталі 12X18H10T, міді МЗ, алюмінію АД0. Роздачею в магнітному полі досягнуто зниження сили деформації і збільшення граничного ступеня формозміни. Для сталі 12X18H10T зниження зусилля роздачі склало 11-19%, для міді МЗ – 5-16%, для алюмінію АД0 – до 19%. Здатність до деформування металу збільшилася на 4-8%. Описано обладнання для штампування в магнітному полі. Описані значення індукції магнітного поля між сердечниками котушок електромагніту в повітряному проміжку різної форми.

Ключові слова: роздача, ступінь деформації, сила, опір деформації, магнітне поле, індукція.

Приведены результаты штамповки раздачей в постоянном магнитном поле индукцией до 1,15 Тл трубчатых цилиндрических заготовок из аустенитной стали 12X18H10T, меди МЗ, алюминия АД0. Раздачей в магнитном поле достигнуто снижение силы деформации и увеличение предельной степени формоизменения. Для стали 12X18H10T снижение усилия раздачи составило 11–19 %, для меди МЗ – 5–16 %, для алюминия АД0 – до 19 %. Деформируемость металла увеличилась на 4–8 %. Описано оборудование для штамповки в магнитном поле. Описаны значения индукции магнитного поля между сердечниками катушек электромагнита в воздушном зазоре различной формы.

Ключевые слова: раздача, степень деформации, сила, сопротивление деформации, магнитное поле, индукция.

A positive effect of the magnetic field on the deformability of nonmagnetic metals is known as a magnetoplastic effect. The developed technology introduces this effect to the metal stamping process. The results of expanding of tubing stock from austenitic steel 12X18H10T, copper МЗ, aluminum АД0 are presented in a constant magnetic field by induction to 1,15 T. A decrease in the force of deformation and an increase in the limiting degree of deformation are achieved in the expanding in a magnetic field. For 12X18H10T steel, the decline of the strain energy was 11–19%, for МЗ copper 5–16%, for aluminum АД0 – up to 19%. The deformability of the metal increased by 4–8%. The ability of metals to forming of expanding depends on their strain resistance. The change of the strain resistance during expanding in a magnetic field is a function that depends on the force of the magnetic field and the degree of deformation. This dependence is presented in the form of a linear equation, where for a fixed value of the induction of 1,15 T the variable is the degree of deformation. The equipment for stamping in a magnetic field is described. The metal is deformed by pressing in the gap between the cores of the electromagnet coils. The values of the magnetic field induction between the cores of the electromagnet coils in the air-gap clearance of various shapes are described.

Keywords: expanding, degree of deformation, strain energy, strain resistance, magnetic field, induction.

Введение. Режимы холодной штамповки определяются в первую очередь реологическими свойствами металла в данных условиях деформации. Улучшение условий обработки металла происходит за счет повышения энергии в зоне деформации. Это достигается путем локализации очага деформации (повышения уровня механической энергии) или применения комбинированных способов обработки с использованием источника других видов энергии, в частности энергии электромагнитного поля.

Постановка проблемы. При изготовлении патрубков, фитингов, соединений труб распространены изделия конусной формы из нержавеющей стали, меди и алюминия, штампуемых раздачей. Способность металлов к формоизменению раздачей зависит от их сопротивления деформации. Этот показатель можно охарактеризовать количеством энергии, расходуемой на развитие дефектов кристаллической решетки, за счет чего и происходит формоизменение металла. Известно положительное влияние магнитного поля на движение дислокаций, на их взаимодействие со стопорами (магнитопластический эффект) [1, 2]. Эффект проявляется в перемещении дислокаций в немагнитных кристаллах, помещенных в постоянное магнитное поле при отсутствии механической нагрузки. Существует ряд исследований о влиянии постоянного магнитного поля на результаты механических испытаний образцов ряда магнитных и немагнитных металлов, описаны частные случаи их деформации [3–6]. Для практического использования

в штамповке постоянного магнитного поля необходимо описание режимов деформации и элементов нового оборудования.

Методика эксперимента. Материалом выбраны немагнитные металлы: аустенитная сталь 12X18H10T, медь МЗ, алюминий АД0. Раздача трубчатых заготовок выполнялась с помощью пуансона с углом конусности 20°. В качестве смазки использовано машинное масло.

Оборудование для раздачи в магнитном поле состоит из электромагнита и гидравлического пресса (см. рис. 1 а). Деформирование металла производится между сердечниками катушек. Для усиления магнитного поля в зоне деформации использованы прямоугольные надставки из магнитомягкой стали (см. рис. 1 б и в).

Штамповка проводилась при следующих условиях: без магнитного поля, с наложением внешнего магнитного поля средней и максимальной индукции. Направление действия магнитного поля – перпендикулярно направлению перемещения пуансона. Подробно условия эксперимента приведены в табл. 1.

Изложение основных материалов исследования. Раздача трубчатых заготовок конусным пуансоном выполнялась до начального момента разрыва края заготовки (АД0) или до образования поперечной складки (МЗ, 12X18H10T). Таким образом фиксировалась максимально возможная степень деформации.

Раздачей в магнитном поле достигнуто снижение силы деформации (см. рис. 2) и увеличение предельной степени формоизменения (см. табл. 2). Для стали 12Х18Н10Т снижение усилия раздачи составило 11–19 %, для меди МЗ – 5–16 %, для алюминия АД0 – до 19 %.

В магнитном поле деформируемость металла увеличилась на 4–8 %. С увеличением индукции магнитного поля его эффективность возрастает.

Таблица 1 – Размеры трубчатых заготовок и сила магнитного поля

Материал	Диаметр, мм	Толщина стенки, мм	Высота, мм	Индукция В, Тл
12Х18Н10Т	6,0	1,0	15	0–1,15
Медь МЗ	6,5	1,0	15	0–1,15
Алюм. АД0	8,0	1,5	20	0–0,80

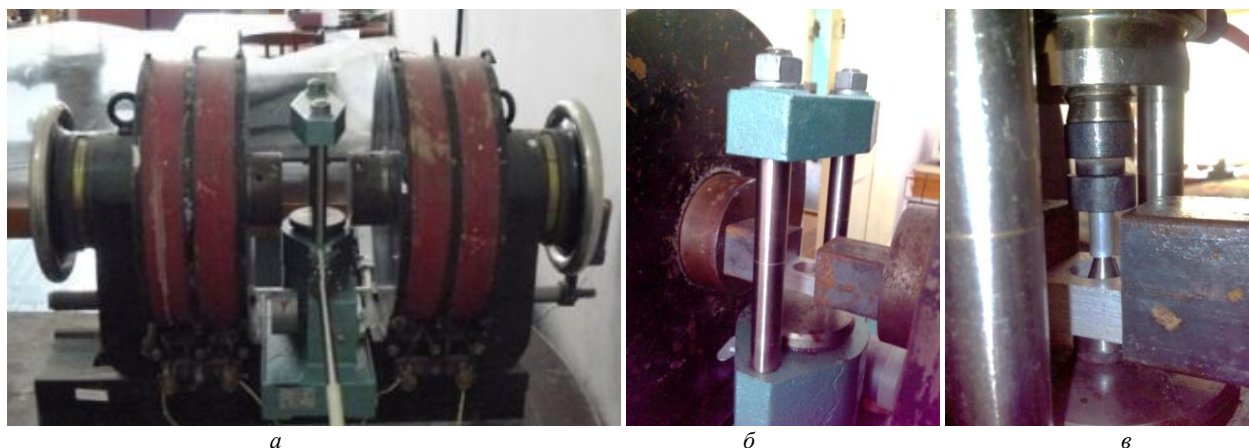


Рис. 1 – Установка для деформации заготовок с применением внешнего магнитного поля:
а – электромагнит и пресс; б – прямоугольные надставки сердечника электромагнита; в – раздача заготовки между надставками

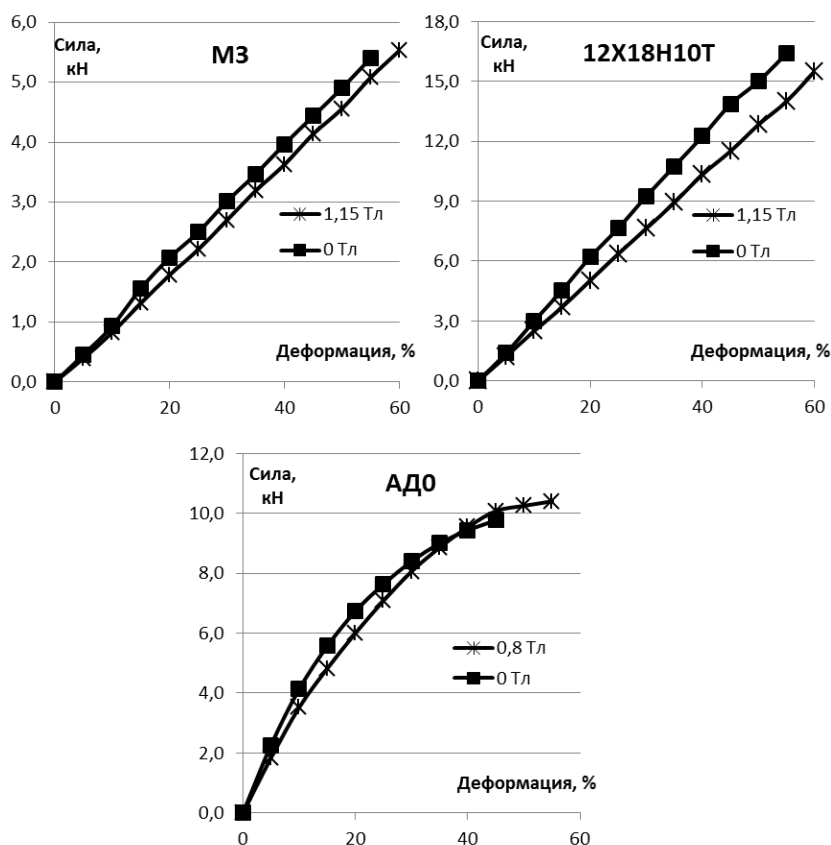


Рис. 2 – Диаграммы раздачи трубчатых заготовок

Таблица 2 – Максимальная степень деформации
раздачей, %

Материал	Индукция В, Тл		
	0	1,06 или 0,50*	1,15 или 0,80*
12Х18Н10Т	53	57	60
Медь МЗ	58	60	62
Алюм. АД0*	45	50*	53*

Известно [7], что в очаге деформации при раздаче цилиндрических заготовок действуют растягивающие напряжения в меридиональном и тангенциальном направлениях. Проведенные ранее исследования [5, 6] показали, что в условиях одноосного растяжения наблюдается снижение сопротивления деформации рассматриваемых металлов. Изменение сопротивления деформации в магнитном поле является функцией, зависящей от силы магнитного поля и степени деформации. Для постоянного магнитного поля с максимальной индукцией зависимость между сопротивлением деформации в магнитном поле σ_{sm} и в исходном состоянии σ_s представлена в виде линейного уравнения (1), где переменной является степень деформации ε (в %). Значения коэффициентов уравнения (1) приведены в табл. 3.

$$\frac{\sigma_{sm}}{\sigma_s} = a_0 + a_1 \varepsilon \quad (1)$$

Таблица 3 – Коэффициенты уравнения (1)

Материал	a_0	a_1 , 1/%
12Х18Н10Т	0,8089	0,0007
Медь МЗ	0,8436	0,0018
Алюминий АД0	0,7874	0,0055

Из полученной зависимости следует, что соотношение значений сопротивления деформации имеет наименьшую величину в начальный период раздачи, а по мере увеличения степени деформации их значения сближаются.

Можно предположить, что магнитное поле оказывает силовое воздействие на заготовку, изменяя соотношение напряжений в очаге деформации. Однако, диамагнитная медь, парамагнитные алюминий и аустенитная сталь являются слабомагнитными материалами. Объемная плотность силового воздействия магнитного поля [8] столь мала (до 8×10^{-7} Н/мм³), что ей можно пренебречь.

Применение магнитного поля при штамповке требует использования специальных магнитопроводов, позволяющих локализовать в зоне деформации поле максимальной силы. Для усиления магнитного поля в зоне деформации использованы наставки с различной формой торцов. Наставки выполнены из стали обыкновенного качества Ст3. Невысокое содержание углерода (0,14–0,22 %) и других легирующих элементов обеспечивает низкую остаточную намагниченность металла наставок. Форма наставок зависит от формы обрабатываемой детали и должна обеспечивать создание магнитного поля максимально возможной силы. Для раздачи, как и для других операций обработки цилиндрических или конических изделий, могут использоваться наставки трех типов (см. рис. 3–5).

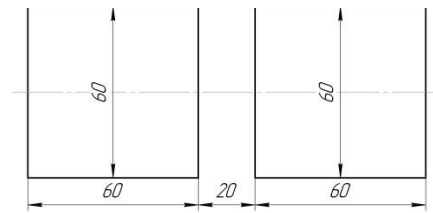


Рис. 3 – Прямоугольная наставка сердечников
электромагнита с плоским торцом

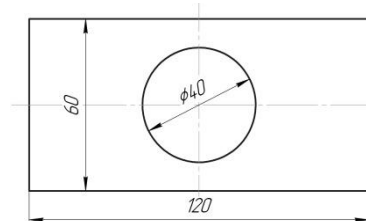


Рис. 4 – Прямоугольная наставка сердечников
электромагнита с отверстием

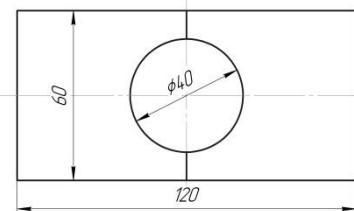


Рис. 5 – Прямоугольная наставка сердечников
электромагнита с разрезом поперек отверстия

Зависимости индукции магнитного поля от силы тока I , величины зазора между наставками L , радиуса R или диаметра D отверстия наставки приведены в формулах (2)–(4). Формула (2) описывает индукцию поля между наставками рис. 3, формула (3) – рис. 4, формула (4) – рис. 5.

$$B = 1,370 + 0,034I - 66,460L, \text{ Тл} \quad (2)$$

$$B = 0,706 + 0,024I - 17,912D, \text{ Тл} \quad (3)$$

$$B = 0,732 + 0,021I - 4,400L - 20,132R, \text{ Тл} \quad (4)$$

При сопоставимых величинах зазора между сердечниками наибольшее значение индукции магнитного поля образуется между плоскими торцами наставок. Индукция внутри отверстия меньше в 3 раза. В наставке третьего типа разрез металла увеличивает индукцию внутри отверстия в 2 раза. Даже при плотно составленных торцах наставки, их разделение является препятствием прохождению магнитного потока. В результате чего магнитный поток увеличивается в пространстве отверстия, но остается меньшим, чем между наставками с плоскими торцами.

Выводы.

1. Постоянное магнитное поле индукцией до 1,15 Тл оказывает влияние на раздачу немагнитных металлов из аустенитной стали, меди и алюминия.

2. Наложение магнитного поля снижает силу раздачи на 5–19 %, повышает деформируемость металла на 4–8 %.

3. Наблюдаемые эффекты связаны с изменением в магнитном поле сопротивления деформации металлов. Описано изменение сопротивления деформации металла в магнитном поле по мере раздачи заготовки.

4. Описаны значения индукции магнитного поля между сердечниками катушек электромагнита в воздушном зазоре различной формы.

5. Результаты данной работы позволяют считать постоянное магнитное поле новым перспективным технологическим фактором, оказывающим влияние на деформируемость немагнитных металлов в процессе их штамповки.

Список литературы

1. Алышц В.И. Магнитоупругий эффект: основные свойства и физические механизмы / В.И. Алышц // Кристаллография. – 2003. – № 5. – С. 826–854.
2. Головин Ю.И. Магнитоупругость твердых тел (обзор) / Ю.И. Головин // Физика твердого тела. – 2004. – №5. – С. 769–803.
3. Дельюсто Л.Г. Основы прокатки металлов в постоянных магнитных полях. М.: Машиностроение, 2005. – 272 с.
4. Коновалов С.В. Влияние электромагнитных полей и токов на пластическую деформацию металлов и сплавов: монография / С.В. Коновалов, В.Е. Громов, Ю.Ф. Иванов. – Новокузнецк: Изд-во «Интер-Кузбасс», 2013. – 293 с.
5. Краев М.В. Влияние постоянного магнитного поля на результаты механических испытаний металлов и сплавов на основе меди и алюминия. Пластическая деформация металлов: Коллективная монография. – Днепропетровск: Акцент ПП, 2014. – С. 337–352.
6. Краев М.В. Обоснование и перспективы комбинированной обработки металлов давлением с использованием постоянного магнитного поля / М.В. Краев, В.С. Краева // Моделирование и развитие процессов обработки металлов давлением: междунар. сб. науч. тр. / под. ред. В.М. Салганика. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2016. Вып. 22. – С. 74–81.
7. Аверкиев А.Ю. Формоизменение трубной заготовки при раздате и обжиме // Кузнечно-штамповочное производство. 2000. – №1. – С. 6–9.
8. Тамм И.Е. Основы теории электричества: Учеб. пособие для вузов. – 11-е изд. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 616 с.

References (transliterated)

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Раздача трубчатых заготовок в постоянном магнитном поле / М. В. Краев, В. С. Краева // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 35 (1257). – С. 30–33. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2519-2671

Раздача трубчатых заготовок в постоянном магнитном поле / М. В. Краев, В. С. Краева // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 35 (1257). – С. 30–33. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2519-2671

Expanding of tubing stock in a constant magnetic field / M. Kraiev, V. Kraieva // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Innovative technologies and equipment of materials processing in engineering and metallurgy. – Kharkov : NTU "KhPI", 2017. – No. 35 (1257). – P. 30–33. – Bibliogr.: 8. – ISSN 2519-2671

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Краєв Максим Валерійович – кандидат технічних наук, провідний інженер відділу технологічного Приватного акціонерного товариства «СВРАЗ Дніпровський металургійний завод», м. Дніпро, тел.: (095) 310-80-68, e-mail: mkraev79@gmail.com

Краєв Максим Валерієвич – кандидат технічних наук, ведучий інженер отдела технологического Частного акционерного общества «ЕВРАЗ Днепропетровский металлургический завод», г. Днепр, тел.: (095) 310-80-68, e-mail: mkraev79@gmail.com

Kraiev Maksym – Candidate of Engineering Sciences, Lead Engineer of Technical Department of Private joint-stock company "EVRAZ Dnieper Metallurgical Plant", Dnepr, tel.: (095) 310-80-68, e-mail: mkraev79@gmail.com

Краєва Віолета Святославівна – кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри фізики Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, м. Дніпро, тел.: (099) 646-87-50, e-mail: kraeva_violetta@i.ua

Краєва Виолетта Святославовна – кандидат фізико-математических наук, доцент, доцент кафедры физики Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, г. Днепр, тел.: (099) 646-87-50, e-mail: kraeva_violetta@i.ua

Kraieva Violetta – Candidate of Physico-mathematical Sciences, Docent, Associate Professor at the Department of Physics, Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan, Dnepr, tel.: (099) 646-87-50, e-mail: kraeva_violetta@i.ua

УДК 621.777.24

В.М. ЛЕВЧЕНКО, Т.Л. КОВОРТНИЙ, В.І. КУЗЬМЕНКО, В.Я. ДАНИЛЕНКО

ВИГОТОВЛЕННЯ ЗАГОТОВОК ДЛЯ КОРПУСІВ КОННЕКТОРІВ ХОЛОДНИМ ВИДАВЛЮВАННЯМ

Дослідженні можливості виготовлення коннекторів типу ВКШУ.753117.035–05 методами холодного об'ємного штампування з максимальним скороченням кількості металу, що йде у відхід при механічній обробці. Вивчена кінематика процесу штампування з циліндричної заготовки за один перехід і можливість отримання видавлюванням напівфабрикату для подальшої механічної обробки із забезпеченням максимального наближення до форми і розмірам готової деталі. Моделювання проводили методом скінчених елементів, що дозволило не тільки досліджувати формозміну заготовки, а й визначити напружено-деформований стан і енергосилові параметри процесу. В результаті проведених досліджень запропоновано технологію виробництва заготовок для деталей даного типу з використанням комбінованого видавлювання з заготовки, що отримується відрізанням від прута діаметром 25 мм.

Ключові слова: коннектор, холодне об'ємне штампування, видавлювання, моделювання, метод скінчених елементів, штамп для комбінованого видавлювання.

Исследованы возможности изготовления коннекторов типа ВКШУ.753117.035–05 методами холодной объемной штамповки с максимальным сокращением количества металла, который идет в отход при механической обработке. Изучена кинематика процесса штамповки из цилиндрической заготовки за один переход и возможность получения выдавливанием полуфабриката для дальнейшей механической обработки с обеспечением максимального приближения к форме и размерам готовой детали. Моделирование проводили методом конечных элементов, что позволило не только исследовать формоизменение заготовки, но и определить напряженно-деформированное состояние и энергосиловые параметры процесса. В результате проведенных исследований предложена технология производства полуфабрикатов для деталей данного типа с использованием комбинированного выдавливания из заготовки, получаемой отрезанием от прута диаметром 25 мм.

Ключевые слова: коннектор, холодное объемная штамповка, выдавливание, моделирование, метод конечных элементов, штамп для комбинированного выдавливания.

The possibilities of manufacturing connectors of the VCSHu.753117.035–05 type by methods of cold three-dimensional stamping with the maximum reduction of the metal quantity that is spent into waste during machining are explored. The kinematics of the stamping process from a cylindrical billet in one operation and the possibility of obtaining extruded semi-finished product for further machining with the maximum approximation to the shape and dimensions of the finished part are studied. Modeling was carried out by the finite element method, which allowed not only to investigate the shape changing of the workpiece, but also to determine the stress-strain state and energy-strength parameters. As a result of the conducted researches the technology of manufacturing of semi-finished products for parts of this type with use of combined extrusion from a workpiece obtained by cutting from bar with a diameter of 25 mm is proposed. The estimated coefficient of use of the material for the proposed technology based on the application of cold three-dimensional stamping is about 60 %, that is almost three times higher compared to machining. According to research results the stamp for the combined extrusion of was designed.

Keywords: connector, cold three-dimensional stamping, extrusion, modeling, finite element method, stamp for combined extrusion.

Вступ. Деталі типу коннекторів є важливою частиною електричних систем, систем управління і широко застосовуються в транспорті, авіаційній техніці і приладобудуванні для з'єднання, як силових, так сигнальних кабелів. Несанкціоноване від'єднання коннектора, може привести до порушення живлення систем або пристроїв, що відповідають за управління або контроль безпеки. Коннектори виготовляють з алюмінієвих сплавів, що забезпечує міцність, корозійну стійкість і економію ваги, шляхом механічної обробки на металорізальних верстатах. Однак такий спосіб виготовлення трудомісткий і призводить до великих втрат – понад 80 % металу при механічній обробці йде в стружку, крім того, при механічній обробці перерізаються волокна металу, що негативно позначається на міцності деталі. Прикладом одного з таких виробів може служити корпус коннектора типу ВКШУ.753117.035 (рис. 1), що виготовляється з алюмінієвого сплаву АВ.

1. Дослідження процесу виготовлення корпусів коннекторів методами холодного об'ємного штампування. Завдання роботи полягало в дослідженні можливості виготовлення коннекторів методами холодного об'ємного штампування (ХОШ) з максимальним скороченням кількості металу, що йде

у відхід при механічній обробці. В даному випадку розглянута сама габаритна модифікація цього типу корпусів коннекторів – ВКШУ.753117.035–05.



Рис. 1 – Коннектори типу ВКШУ.753117.035

Спочатку була вивчена кінематика процесу штампування з циліндричної заготовки за один перехід і можливість отримання видавлюванням напівфабрикату для подальшої механічної обробки із забезпеченням максимального наближення до форми і розмірам готової деталі.

Оскільки відносно тонкий і широкий фланець коннектора має в плані форму квадрата, то процес видавлювання таких елементів характеризується на кінцевій стадії нерадіальними (так званим вихровим) плином металу від центру до периферії. Така форма

фланця значно ускладнює заповнення порожнини рівчака в кутових ділянках фланця і призводить до значної нерівномірності радіальної деформації за його периметром. Проведені раніше на кафедрі обробки металів тиском НТУ «ХПІ» експериментальні дослідження показали, що пуансон-матриця з квадратним зовнішнім профілем не витримує при видавлюванні питомих навантажень і руйнується в тонких місцях (за осями квадрата). Тому було прийнято рішення отримувати видавлюванням круглий в плані фланець із зовнішнім діаметром, що відповідає розміру діагоналі квадратного фланця деталі (рис. 2). У такому випадку процес видавлювання можна вважати практично осесиметричною задачею (винятком є наявність відносно невеликих елементів – зовнішнього і внутрішніх замків).



Рис. 2 – Тривимірна геометрична модель штампівки

Моделювання проводили методом скінчених елементів, що дозволило не тільки досліджувати формозміну заготовки, а й визначити напружено-деформований стан і енергосилові параметри. В результаті проведених досліджень запропоновано технологію виробництва заготовок для деталей даного типу з використанням комбінованого видавлювання з заготовки, що отримується відрізанням від прута діаметром 25 мм.

Процес видавлювання заготовки конекторів відноситься до комбінованих процесів з декількома ступенями свободи течії металу, що ускладнює його теоретичний аналіз з точки зору кінематики течії металу і рішення задачі аналізу формозміни. У процесі штампування метал може рухатись за напрямком руху інструменту, в протилежному напрямку, а також в радіальному напрямку, формуючи кільцевий фланець.

Скінченоелементну сітку на інструменті не будували, тому що інструмент вважався абсолютно жорстким, а тепломобін з заготовкою в умовах холодної пластичної деформації є неактуальним. Це дозволило, не погіршуючи адекватності моделювання, істотно скоротити час, необхідний для проведення розрахунків на комп'ютері. Сітка скінчених елементів на заготовці генерувалась в автоматичному режимі. На основі зіставлення результатів обчислень з різною кількістю кінцевих елементів для задачі, що розв'язувалась, число елементів 32000 виявилось достатнім з точки зору забезпечення стійкості рішення і тимчасових витрат на моделювання. Розрахунок проводився за кроками. Кількість кроків переміщення інструменту варіювався залежно від ходу інструменту,

а величина кроку в процесі деформування не змінювалася.

Між верхньою і нижньою порожнинами видавленою деталі, що видавлюється, була передбачена перемичка, так як отримати наскрізний отвір методами ХОШ не представляється можливим. Ця перемичка видаляється наступною механічною обробкою або обрізанням в штампі. Мала товщина перемички призводить до значного зростання зусилля в кінці робочого ходу інструменту, а невинуватене збільшення товщини призводить до надмірного витрати металу і збільшення його обсягу, що підлягає подальшого видалення механічною обробкою. Рекомендовані в літературі емпіричні значення товщини перемички для розглянутих діаметрах нижньої і верхньої порожнин лежать в межах 3...5 мм [1–5]. Особливістю конструкції деталі є те, що товщина перемички може бути збільшена лише за рахунок зменшення глибини нижньої порожнини (збільшення розміру Δ), а розмір δ змінювати не можна (рис. 3).

Аналіз кінематики процесу видавлювання показав, що метал, в процесі деформації інтенсивно рухається від центру за радіусом в область фланця (осаджування та радіальне видавлювання), а також заповнює кільцеву область в нижній частині рівчака штампа (зона Б, см. рис. 3) – пряме видавлювання. Заповнення верхньої кільцевої області (зона А, див. рис. 3) відбувається набагато гірше (процес зворотного видавлювання). Формування нижньої частини штампівки є менш проблемним, в наслідок не тільки її меншої висоти, але і тому, що вона знаходиться практично на одному рівні відносно фланця (розмір δ , див. рис. 3), який дорівнює всього 0,3 мм), що перешкоджає активному радіальному течією металу із зони, розташованої вище (розмір Δ , див. рис. 3) і, навпаки, сприяє заповненню нижньої кільцевої області. Створити такі ж умови для верхньої кільцевої області не представляється можливим через особливості заданої конструкції конектора та неможливість збільшення розміру δ за рахунок зменшення фланця вздовж його осі вниз або збільшення висоти перемички за рахунок верхньої порожнини, розмір же Δ збільшувати можна, хоча це і призводить до збільшення товщини перемички і додаткової витрати металу.

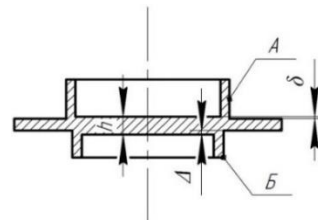


Рис. 3 – Розрахункова схема штампівки

Моделювання процесу показало, що крім цього формування верхньої кільцевої стінки здійснюється не тільки за рахунок видавлювання металу з-під торця пуансона, а й за рахунок зворотного радіального руху

металу за радіусом з фланця (тобто від периферії до центру) (рис. 4, а–в). Останнє виникає через те, що фланець у момент формування свого зовнішнього радіального розміру має збільшену висоту та продовжує осаджуватися. Схема з переміщенням металу за радіусом від периферії до центру є енергетично прогашною, тому що обмеження можливості руху за радіусом назовні призводить до значного збільшення зусилля внаслідок того, що для частинок металу на периферійній частині фланця напрямку руху за радіусом до центру не буде напрямком найменшого спротиву.

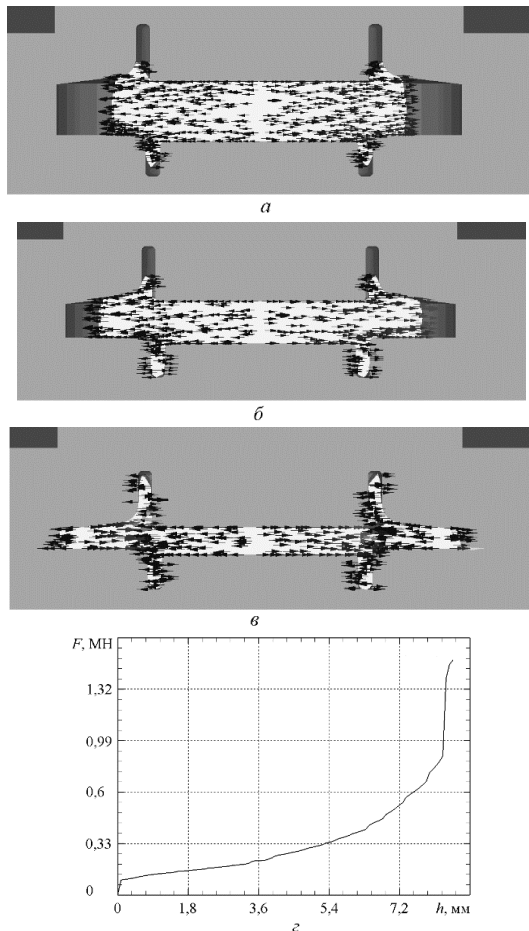


Рис. 4. – Моделювання процесу штампування деталі «Корпус» за одну операцію методом скінчених елементів: а, б, в – розподіл радіальної компоненти швидкості за ходом інструмента, г – графік зусилля

З метою зменшення зусилля було розглянуто варіант і з відкритим штампуванням в зоні фланця. Проведені чисельні експерименти, показали, що при відсутності обмежень на переміщення в радіальному напрямку у фланці метал заготовки витрачається на збільшення діаметра фланця за рахунок незаповнення верхньої кільцевої області.

2. Розробка технології холодного штампування корпусів коннекторів. Для забезпечення необхідної висоти видавлювання верхньої кільцевої частини запропоновано схему зі штампуванням за дві операції: попереднє калібрування з осаджуванням вихідної заготовки (рис. 5, а) на 3,6 мм і збільшенням

її діаметру з 25 до 27 мм за всією висотою крім кільцевої ділянки, що центрує, в нижній частині (висота 2 мм) з попереднім формуванням верхньої кільцевої області (розрахункова висота 1,5 мм) (рис. 5, б) і власне штампування з видавлюванням кільцевих ділянок і фланця (рис. 5, в).

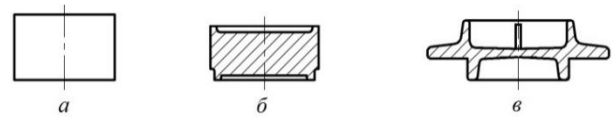


Рис. 5. – Схема отримання заготовки зі штампуванням за дві операції: а – вихідна заготовка, б – заготовка після калібрування, в – штампівка після видавлювання

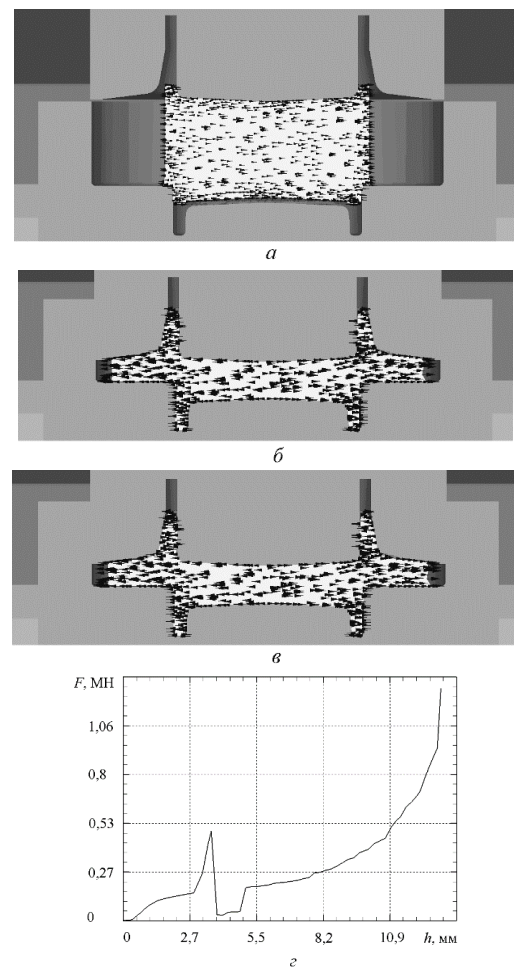


Рис. 6. – Моделювання процесу штампування деталі «Корпус» за дві операції методом скінчених елементів: а, б, в – розподіл радіальної компоненти швидкості за ходом інструмента, г – графік зусилля

Аналіз кінематики і силового режиму для штампування за такою схемою показав, що за рахунок попередньої деформації на першій операції можна поліпшити заповнення верхньої кільцевої області, змінити кінематику течії металу у фланці (метал тече від центру по радіусу протягом всього процесу штампування (рис. 6, а–в)), що дозволяє знизити максимальне зусилля (див. рис. 4, г та рис. 6, г).

Висновки. Розрахунковий коефіцієнт використання матеріалу для запропонованої технології, яка

базується на застосуванні ХОШ, становить 60 %, що майже в три рази вище в порівнянні з механічною обробкою. За результатами досліджень спроектовано штамп для комбінованого видавлювання заготовок коннекторів типу ВКШУ.753117.035–05. Розроблену технологію і робочі кресленики штампа для видавлювання заготовок коннекторів передані для впровадження на ПАТ «Завод «ЛТАВА» (м. Полтава), де було виготовлено штампове оснащення і отримані зразки заготовок для коннекторів типу ВКШУ.753117.035–05 задовільної якості.

Список літератури

1. Евстратов В. А. Основы технологии выдавливания и конструирования штампов / В. А. Евстратов. – Харьков: Вища шк., 1987. – 144 с.
2. Ганаго О. А. Расчет и совершенствование конструкций штампов для холодного выдавливания / О. А. Ганаго, В. А. Евстратов, Т. Л. Евстратова, В. Л. Марченко. – М.: Машиностроение, 1986. – 57 с.
3. Навроцкий Г. А. Холодная объемная штамповка: Справочник. / Г. А. Навроцкий, В. А. Головин, А. Ф. Нистратов [и др.]. – М.: Машиностроение, 1973. – 496 с.
4. Овчинников А. Г. Основы теории штамповки выдавливанием на прессах / А. Г. Овчинников. – М.: Машиностроение, 1983. – 200 с.

5. Евстратов В. А. Оптимизация технологических процессов и конструкций штампов для холодного и полугорячего выдавливания. Методические рекомендации. / В. А. Евстратов, О. М. Иванов, В. И. Кузьменко [и др.]. – М.: ВНИИТЭМР, 1989. – 192 с.

References (transliterated)

1. Evstratov V. A. *Osnovy tekhnologii vydavlivaniya i konstruirovaniya shtampov* [Basics of extrusion technology and dies design]. Khar'kov, Vishcha shk. Publ., 1987. 144 p.
2. Ganago O. A., Evstratov V. A., Evstratova T. L., Marchenko V. L. *Raschet i sovershenstvovanie konstruktivnykh shtampov dlya kholodnogo vydavlivaniya* [Calculation and improvement of dies design for cold extrusion]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1986. 57 p.
3. Navrotsky G. A., Golovin V. A., Nistratov A. F. *Kholodnaya ob'emnaya shtampovka: Spravochnik* [Cold forging: Handbook.]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1973. 496 p.
4. Ovchinnikov A. G. *Osnovy teorii shtampovki vydavlivaniem na pressakh* [The basis of the theory of stamping by extrusion on presses]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1983. 200 p.
5. Evstratov V. A. *Optimizatsiya tekhnologicheskikh protsessov i konstruktivnykh shtampov dlya kholodnogo i polugoryachego vydavlivaniya. Metodicheskie rekomendatsii* [Optimization of technological processes and designs of dies for cold and semi-hot extrusion. Guidelines.]. – Moscow, VNIITEMR Publ., 1989. 192 p.

Надійшла (received) 13.11.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Виготовлення заготовок для корпусів коннекторів холодним видавлюванням / В. М. Левченко, Т. Л. Коворотний, В. І. Кузьменко, В. Я. Даниленко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 35 (1257). – С. 34–38. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2519-2671.

Изготовление заготовок для корпусов коннекторов холодным выдавливанием / В. Н. Левченко, Т. Л. Коворотный, В. И. Кузьменко, В. Я. Даниленко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 35 (1257). – С. 34–38. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2519-2671.

The manufacture of blanks for connector housings by cold extrusion / V. M. Levchenko, T. L. Kovorotnyy, V. I. Kuz'menko, V. Ya. Danylenko // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy. – Kharkov : NTU «KhPI», 2017. – No. 35 (1257). – P. 34–38. – Bibliogr.: 5. – ISSN 2519-2671.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Левченко Володимир Миколайович – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри обробки металів тиском; тел.: (067) 572-53-44; e-mail: goldangel271@gmail.com

Левченко Владимир Николаевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры обработки металлов давлением; тел.: (067) 572-53-44; e-mail: goldangel271@gmail.com

Levchenko Volodymyr Mykolayovych – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Senior Researcher, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Associate Professor at the Department of Treatment of Metals by Pressure; tel.: (067) 572-53-44; e-mail: goldangel271@gmail.com

Коворотний Тимофій Леонідович – асистент кафедри обробки металів тиском, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; тел.: (098) 842-01-04; e-mail: kovotima@gmail.com

Коворотный Тимофей Леонидович – ассистент кафедры обработки металлов давлением, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»; тел.: (098) 842-01-04; e-mail: kovotima@gmail.com

Kovorotnyy Tymofiy Leonidovych – Assistant at the Department of Treatment of Metals by Pressure, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»; tel.: (098) 842-01-04; e-mail: kovotima@gmail.com

Кузьменко Віктор Іванович – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри обробки металів тиском; тел.: (050) 541-16-22; e-mail: vileta067@gmail.com

Кузьменко Виктор Иванович – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», профессор кафедры обработки металлов давлением; тел.: (050) 541-16-22; e-mail: vileta067@gmail.com

Kuz'menko Viktor Ivanovych – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Full Professor at the Department of Treatment of Metals by Pressure; tel.: (050) 541-16-22; e-mail: vileta067@gmail.com

Даниленко Віктор Якович – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри обробки металів тиском; тел.: (068) 610-90-35; e-mail: 44danilenko@gmail.com

Даниленко Виктор Яковлевич – кандидат технических наук, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры обработки металлов давлением; тел.: (068) 610-90-35; e-mail: 44danilenko@gmail.com

Danylenko Viktor Yakovych – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Associate Professor at the Department of Treatment of Metals by Pressure; tel.: (068) 610-90-35; e-mail: 44danilenko@gmail.com.

В.В. ЛИМАРЕНКО, І.П. ХАВІНА

СИНТЕЗ СТРУКТУРИ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ОБРОБКИ МЕТАЛІВ РІЗАННЯМ

Поставлено та вирішено актуальне науково-практичне завдання синтезу структури технологічних процесів обробки металів різанням. Завдання вирішене з використанням методів декомпозиції та послідовного ієрархічного синтезу з використанням механізмів штучного інтелекту, а саме – продукційних правил та штучних нейронних мереж. Наведено архітектуру системи, структурну схему баз знань, приклади продукційних правил та приклад отриманих результатів роботи.

Ключові слова: синтез структури технологічних процесів, штучний інтелект, продукційні правила, штучні нейронні мережі.

Поставлена и решена актуальная научно-практическая задача синтеза структуры технологических процессов обработки металлов резанием. Задача решена с использованием методов декомпозиции и последовательного иерархического синтеза с использованием механизмов искусственного интеллекта, а именно – продукционных правил и искусственных нейронных сетей. Приведены архитектура системы, структурная схема баз знаний, примеры продукционных правил и пример полученных результатов работы.

Ключевые слова: синтез структуры технологических процессов, искусственный интеллект, продукционные правила, искусственные нейронные сети.

The actual scientific and practical task of synthesizing the structure of technological processes of metal processing by cutting (turning, milling, etc.) has been set and solved. The problem is solved using decomposition methods and sequential hierarchical synthesis. To solve the problem of structural synthesis of technological processes of machining of metals by cutting, that is, finding the best alternative from a variety of possible alternatives, production rules are implemented, which are implemented using the language of Visual Prolog, an example of the production rules used. Also, in solving the problem, artificial neural networks were used. As a result of the work, a system of intellectual decision support was created in the synthesis of technological processes of machining – «Opticut», the architecture of which is given in the article. For the work of the system, knowledge bases are developed, a structural diagram of one of them is given. The structure of the obtained technological process is given in the form of a route map for processing the surfaces of the workpiece, an example of the obtained route map is given.

Keywords: synthesis of the structure of technological processes, artificial intelligence, production rules, artificial neural networks.

Актуальність теми. На сучасному етапі розвитку промисловості велику роль відіграє питання поліпшення ефективності технологічних процесів (ТП) механічної обробки різанням (операції точіння, фрезерування, та інше). Одним з основних напрямків є застосування програмних комплексів на основі методів штучного інтелекту для синтезу ТП механообробки металів. На Україні ще недостатньо розвинене виробництво сучасного металообробного обладнання та інструментів, а обладнання іноземного виробництва має дуже високу вартість, тому є актуальною саме розробка систем інтелектуальної підтримки прийняття рішень (СППР) для синтезу ТП механообробки металів. Відсутність таких СППР не дозволяє підприємствам повною мірою скористатися наявними можливостями високотехнологічного обладнання і знижує ефективність і прибутковість виробництва через нерациональне використання верстатного парку, матеріальних і інженерних ресурсів підприємств [1, с. 1–20; 2, с. 5–18; 3, с. 37–44].

Виклад основного матеріалу дослідження. Робота присвячена постановці та вирішенню завдання визначення структури ТП механічної обробки металів різанням. Структуру технологічного процесу S_{SP} можна представити, як сукупність часової складової T_C , функціональної складової F_C та просторової складової P_C [3, с. 37–44; 4, с. 220–223]

$$S_{SP} = \{T_C, F_C, P_C\} \Rightarrow \begin{cases} \min_k \left(\sum_1^i A_i \right), k = \overline{1, \dots, K}, \\ \min_k \left(\sum_1^i \mathcal{E}_i \right), k = \overline{1, \dots, K}, \\ \max_k \left(\sum_1^i Q_i \right), k = \overline{1, \dots, K}, \end{cases}$$

де T_C визначає послідовність виконання операцій O_{ij} в часі на кожній стадії обробки заготовки $T_C = \{P_{11}(O_{11}, O_{12}, \dots, O_{1j}), P_{21}(O_{21}, O_{22}, \dots, O_{2j}), \dots, P_{I1}(O_{I1}, O_{I2}, \dots, O_{Ij})\}$, де P_{ij} – послідовність стадій обробки поверхонь заготовки, i – число стадій обробки, для отримання деталі, j – номер поверхні, яку потрібно обробити, $i = \overline{1, \dots, I}$, $j = \overline{1, \dots, J}$; функціональна складова F_C визначає порядок перетворення заготовки з початкового стану Z_1 в кінцевий стан Z_I за допомогою послідовності операцій O_{ij} , $O_{ij}: Z_{i-1} \rightarrow Z_i$; просторова складова P_C визначає розмірні і точнісні зв'язки між базовими і робочими поверхнями, тобто визначає схему установки деталі в пристосуванні або верстаті; k – кількість можливих альтернатив, $k = \overline{1, \dots, K}$; A_i – собівартість операцій; $\mathcal{E}_i$ – питомі енерговитрати на операціях; Q_i – продуктивність операцій.

В той же час структуру ТП механообробки металів різанням M_{TP} можна представити у вигляді множини, що містить: заготовку $M_{ЗАГ}$, послідовність операцій $M_{ОПЕР}$, необхідне обладнання $M_{ОБОР}$,

інструмент $M_{\text{інст}}$, пристосування $M_{\text{присп}}$ та мастильно-охолоджувальні технологічні середовища (МОТС) $M_{\text{сотс}}$,

$$M_{\text{тп}} = \{M_{\text{заг}}, M_{\text{опер}}, M_{\text{обор}}, M_{\text{інст}}, M_{\text{присп}}, M_{\text{сотс}}\}$$

Формування множини здійснюється на основі положень фундаментальної теорії різання і даних креслення виробу, даних про верстати, заготовки, інструменти, пристосування і МОТС, що застосовуються на підприємстві, сформованих в роботі евристичних правил на підґрунті технічного та технологічного досвіду експертів-технологів та критеріїв оптимізації з урахуванням наявних технічних і технологічних обмежень, що накладаються на вибір заготовки, інструменту, пристосувань, операцій та МОТС. Завдання структурного синтезу ТП вирішується з використанням методів декомпозиції та послідовного ієрархічного синтезу за допомогою продукційних правил.

Визначення заготовки $M_{\text{заг}}$ здійснюється по критерію мінімальної різниці об'єму заготовки та деталі, та має вигляд

$$M_{\text{заг}} = \min_{M_{\text{заг}}^t \in \Phi_1^t} (V_{\text{заг}}^t - V_{\text{д}}) \Rightarrow \min,$$

де

$$\begin{aligned} M_{\text{заг}}^t &= \min_{M_{\text{заг}}^t \in \Phi_1^t} \{M_{\text{заг}}^t(a, b, c), \dots, M_{\text{заг}}^t(a, b, c)\}, \\ a &= X_{\text{заг}} - (X_{\text{д}} + P_{\text{обр}}), b = Y_{\text{заг}} - (Y_{\text{д}} + P_{\text{обр}}), c = \\ &= Z_{\text{заг}} - (Z_{\text{д}} + P_{\text{обр}}), \\ a, b, c &\geq 0, \end{aligned}$$

де $M_{\text{заг}}^t$ – множина з Φ_1^t заготовок, що сформована за критерієм допустимих габаритних розмірів заготовок, $\Phi_1^t = 1, \dots, \Phi_1^t$; $V_{\text{заг}}^t$ – об'єм заготовки; $V_{\text{д}}$ – об'єм деталі; Φ_1 – кількість заготовок на підприємстві,

$\Phi_1 = 1, \dots, \Phi_1$; a, b, c – розмір матеріалу, що фактично знімається по вісям x, y, z , мм; $X_{\text{заг}}, Y_{\text{заг}}, Z_{\text{заг}}$ – розмір заготовки, мм; $X_{\text{д}}, Y_{\text{д}}, Z_{\text{д}}$ – габаритний розмір деталі, мм; $P_{\text{обр}}$ – припуск на обробку, мм.

Правило перевірки габаритних розмірів заготовки та марки сталі наступне:

$$\text{Якщо } M_{\text{заг}}(a) \geq 0, M_{\text{заг}}(b) \geq 0, M_{\text{заг}}(c) \geq 0 \wedge Z_{\text{сталь}} = Z_{\text{сталь.задано}}, \text{ то } M_{\text{заг}} = \{M_{\text{заг}}\}$$

де $Z_{\text{сталь}}$ – марка матеріалу заготовки; $Z_{\text{сталь.задано}}$ – марка матеріалу деталі.

Визначення множини можливих операцій для поверхні $M_{\text{опер}}$, що задана, має вигляд

$$M_{\text{опер}} = \{M_{\text{опер}\Phi_2}, \dots, M_{\text{опер}\Phi_2}\}$$

де Φ_2 – число можливих варіантів операцій, $\Phi_2 = 1, \dots, \Phi_2$.

Вибір операцій здійснюється за правилами

$$\begin{aligned} \text{Якщо } F_{\text{п}} = \text{"тіло обертання"}, \text{ то } M_{\text{опер}\Phi_2} &= \text{"точіння"} \vee \\ \vee \text{ якщо } F_{\text{п}} = \text{"площина"}, \text{ то } M_{\text{опер}\Phi_2} &= \text{"фрезерування"} \vee \\ \vee \text{ якщо } F_{\text{п}} = \text{"отвір"}, \text{ то } M_{\text{опер}\Phi_2} &= \text{"свердління"}. \\ \text{Якщо } M_{\text{опер}\Phi_2} \in M_{\text{опер.альт}} \{M_{\text{опер.альт}\Phi_a}, \dots, M_{\text{опер.альт}\Phi_a}\} \wedge \\ M_{\text{опер.альт}\Phi_a} &= M_{\text{опер}\Phi_2-1}, \text{ то } M_{\text{опер}} = M_{\text{опер.альт}\Phi_a} \vee \text{ якщо } \\ M_{\text{опер}\Phi_2} \notin M_{\text{опер.альт}} \{M_{\text{опер.альт}\Phi_a}, \dots, M_{\text{опер.альт}\Phi_a}\}, \\ \text{то } M_{\text{опер}} &= M_{\text{опер}\Phi_2}, \end{aligned}$$

де $F_{\text{п}}$ – форма поверхні; $M_{\text{опер.альт}}$ – альтернативний вид операції.

Вибір множини допустимого за типом операції обладнання $M_{\text{обор}}$ має вигляд

$$M_{\text{обор}} = \{M_{\text{обор}\Phi_3}, \dots, M_{\text{обор}\Phi_3}\}$$

де Φ_3 – число можливих варіантів обладнання, $\Phi_3 = 1, \dots, \Phi_3$, здійснюється за правилом

$$\begin{aligned} \text{Якщо } M_{\text{заг}\Phi_1}(X_{\text{заг}}, Y_{\text{заг}}, Z_{\text{заг}}) &\leq \{SP_{\text{обор.предп}}(X_{\text{раб.зон}}, \\ Y_{\text{раб.зон}}, Z_{\text{раб.зон}})\} \wedge M_{\text{опер}\Phi_2} &\in \{SP_{\text{оп.обор}}\}, \text{ то } M_{\text{обор}} = \\ &= \{M_{\text{обор}\Phi_3}\}, \end{aligned}$$

де $SP_{\text{обор.предп}}$ – список обладнання підприємства; $X_{\text{раб.зон}}, Y_{\text{раб.зон}}, Z_{\text{раб.зон}}$ – розмір робочої зони верстату, мм; $SP_{\text{оп.обор}}$ – список операцій, що виконуються на верстаті.

Вибір множини допустимого за типом операції інструменту $M_{\text{інст}}$ має вигляд

$$M_{\text{інст}} = \{M_{\text{інст}\Phi_4}, \dots, M_{\text{інст}\Phi_4}\}$$

де Φ_4 – число можливих варіантів обладнання, $\Phi_4 = 1, \dots, \Phi_4$, здійснюється за правилом

$$\begin{aligned} \text{Якщо } M_{\text{опер}\Phi_2} \in \{SP_{\text{оп.інс}}\} \wedge M_{\text{інст}\Phi_4}(X_{\text{інс}}, Y_{\text{інс}}, Z_{\text{інс}}) &\leq \\ \leq \{SP_{\text{обор.предп}}(X_{\text{держ}}, Y_{\text{держ}}, Z_{\text{держ}})\}, \text{ то } M_{\text{інс}} &= \{M_{\text{інст}\Phi_4}\}, \\ \text{де } SP_{\text{оп.інс}} &\text{ – список операцій на яких може бути використаний інструмент; } X_{\text{інс}}, Y_{\text{інс}}, Z_{\text{інс}} \text{ – розмір інструменту, мм; } X_{\text{держ}}, Y_{\text{держ}}, Z_{\text{держ}} \text{ – розмір державки інструменту, мм.} \end{aligned}$$

Визначення пристосування $M_{\text{присп}}$ здійснюється по критерію жорсткістю закріплення, та має вигляд

$$M_{\text{присп}} = \max_{M_{\text{присп}\Phi_5} \in \Phi_5} \{M_{\text{присп}\Phi_5}(k), \dots, M_{\text{присп}\Phi_5}(k)\}$$

де Φ_5 – число можливих варіантів пристосувань, $\Phi_5 = 1, \dots, \Phi_5$; k – коефіцієнт, що залежить від методу закріплення деталі в патроні.

Вибір необхідного пристосування здійснюється за правилом

Якщо $M_{ЗАГ\Phi_1}(X_{ЗАГ}, Y_{ЗАГ}, Z_{ЗАГ}) \leq \{SP_{ОБОР.ПРЕДП}(X_{ПРИС}, Y_{ПРИС}, Z_{ПРИС})\}$, то $M_{ПРИС} = \{M_{ПРИС\Phi_5}\}$,

де $X_{ПРИС}$, $Y_{ПРИС}$, $Z_{ПРИС}$ – розміри пристосувань верстату, мм.

Визначення МОТС $M_{СОТС}$ за мінімальною вартістю має вигляд

$$M_{СОТС} = \min_{M_{СОТС\Phi_6} \in \Phi_6} \{M_{СОТС\Phi_6}(\Pi_{СОТС}), \dots, M_{СОТС\Phi_6}(\Pi_{СОТС})\}$$

де Φ_6 – число можливих варіантів МОТС, $\Phi_6 = 1, \dots, \Phi_6$; $\Pi_{СОТС}$ – вартість МОТС з урахуванням обмежень здійснюється за правилом

Якщо $M_{СОТС\Phi_6} = \{SP_{СОТС.ОБОР}\} \wedge M_{ОПЕР\Phi_2} \in \{SP_{СОТС.ОБОР}\} \wedge \wedge Z_{СТАЛЬ} = \{SP_{СОТС.ОБОР}\}$, то $M_{СОТС} = \{M_{СОТС\Phi_6}\}$

де $SP_{СОТС.ОБОР}$ – список МОТС, що використовуються на верстаті.

При такому підході задача має багатоваріантне рішення, тому остаточне рішення по визначенню $M_{ОБОР}$ та $M_{ИНСТ}$ буде отримане після визначення оптимальних операційних параметрів, по критеріях

$$M_{ОБОР} \Rightarrow \begin{cases} \min(A_{\Phi_3}) \\ \min(\Xi_{\Phi_3}) \\ \max(Q_{\Phi_3}) \end{cases}, \quad M_{ИНСТ} \Rightarrow \begin{cases} \min(A_{\Phi_4}) \\ \min(\Xi_{\Phi_4}) \\ \max(Q_{\Phi_4}) \end{cases}$$

де A_{Φ_3} – собівартість операції на Φ_3 обладнанні; Ξ_{Φ_3} – питомі енерговитрати на Φ_3 обладнанні; Q_{Φ_3} – продуктивність операції на Φ_3 обладнанні; A_{Φ_4} – собівартість операції на Φ_4 інструменті; Ξ_{Φ_4} – питомі енерговитрати на Φ_4 інструменті; Q_{Φ_4} – продуктивність операції на Φ_4 інструменті.

Для вирішення завдання структурного синтезу ТП механообробки металів різанням, тобто знаходження оптимальної альтернативи з множини можливих альтернатив застосовані продукційні правила, які реалізовані за допомогою мови Visual Prolog [5, с. 12-544; 6, с. 9-265]. Нижче наведено фрагменти прикладів продукційних правил на мові Visual Prolog.

```
// Операция (стадии, 3д-объект, №поверхностей)
tochenie("черновое", "конус", 1, 2, 3, _ , _).
tochenie("черновое", "призма", 1, 2, 3, 4, 5, 6).
```

```
...
//Замена операций (3д-объект, №поверхностей, замена)
shlifovanie_zamena("сфера", 1, _ , _ , _ , _ , _ , "фрезерование", "точение").
tochenie_zamena("усеченный конус", 1, 3, _ , _ , _ , _ , "фрезерование").
```

```
...
//Порядок обработки (3д-объект, последовательность обработки по №)
porjadok_obrabotki("конус", "фрезерование", 1, _ , _ , _ , _ , "точение", 2, _ , _ , _ , _).
```

```
porjadok_obrabotki("усеченный конус", "фрезерование", 1, 3, _ , _ , _ , "точение", 2, _ , _ , _ , _).
```

```
...
stanok("DMTG-VT30", "tochenie", 50, 100, 60, 500, 1000, 78, 1000, 1200, 97, _ , _ , 50, 1200, 1, 3000, 720, 720, 800, 22, "Alberg CCMW 09T308", "Iscar CCMT 09T308", "Sandvik CB7015 S01020", " ", " ", " ", " ").
```

У роботі для синтезу ТП механообробки різанням було розроблено СІППР «Opticutt», архітектура якої наведена на рис. 1.

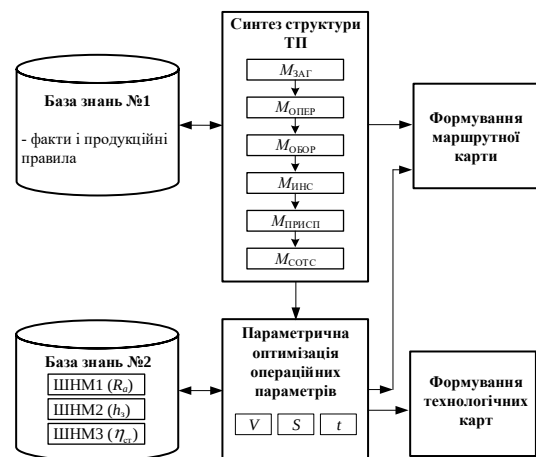


Рис. 1 – Архітектура СІППР «Opticutt»

Для функціонування СІППР були розроблені і створені за допомогою продукційних правил та штучних нейронних мереж (ШНМ) дві бази знань (БЗ), які включають дані про обладнання цеху, заготовки та інструмент, досвід експертів-технологів та т.і. в вигляді продукційних правил – БЗ № 1, та БЗ № 2, що містить вагові коефіцієнти для ШНМ 1–ШНМ 3, де: ШНМ 1 – призначена для розрахунку рівня шорсткості R_a ; ШНМ 2 – призначена для розрахунку рівня зносу інструменту по задній поверхні h_3 ; ШНМ 3 – для розрахунку ККД верстату $\eta_{ст}$.

На рис. 2 показано структурну схему бази знань по операціях, верстатах, пристосуваннях, інструментах і ін.

Структура ТП, як правило, надається у вигляді маршрутної карти, у табл. 1 наведено фрагмент отриманої маршрутної карти обробки поверхонь на прикладі деталі «Корпус фільтра».

Висновки: в роботі поставлено та вирішено науково-практичне завдання синтезу структури технологічних процесів обробки металів різанням. Завдання вирішене з використанням методів декомпозиції та послідовного ієрархічного синтезу. Для практичного вирішення завдання у роботі використано методи штучного інтелекту – продукційні правила, які реалізовані за допомогою мови Visual Prolog. Для синтезу технологічних процесів механообробки різанням було розроблено СІППР «Opticutt».

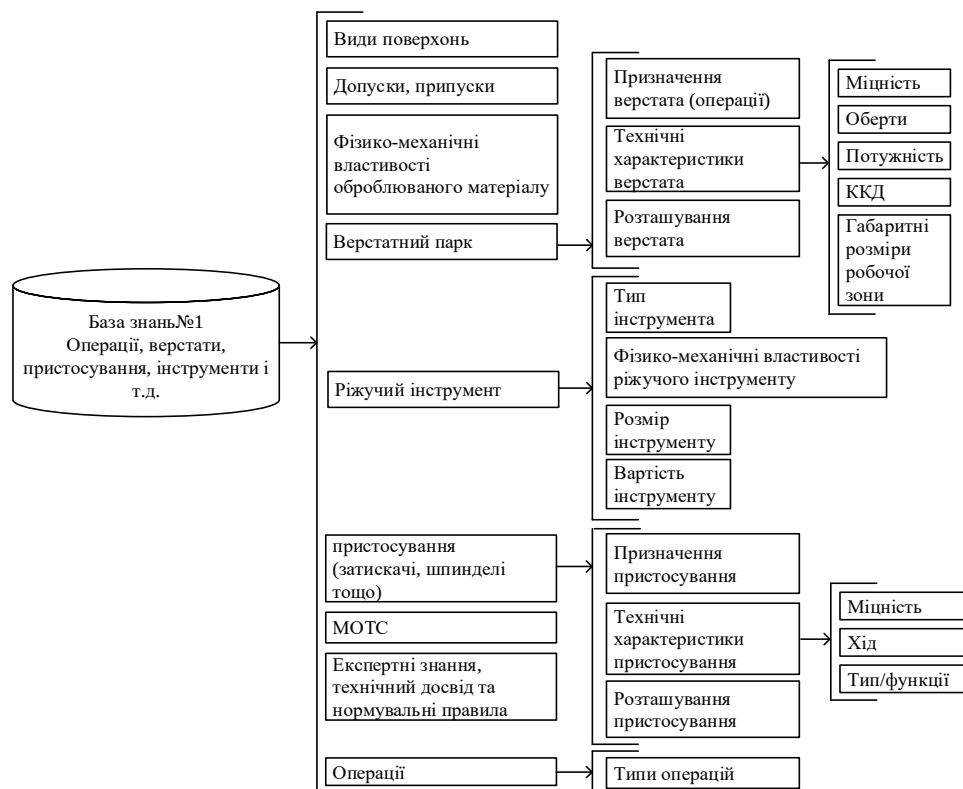


Рис. 2 – Структурна схема бази знань по операціях, верстатах, пристосуваннях, інструментах і ін.

Таблиця 1 – Фрагмент маршрутної карти обробки поверхонь деталі «Корпус фільтра»

№ п.п	№ поверхні	Вид поверхні	Квалітет	Шорсткість R_{max} , мкм	Операції обробки поверхонь	Верстат	Інструмент	Прийомування
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1	торець	8	10	точіння чорнове	DMTG-VT30	Iscar CCMT 09T308	Планшайба
					точіння чистове	DMTG-VT30	Iscar CCMT 09T308	Планшайба
2	2	циліндр	7	0,64	точіння чорнове	DMTG-VT30	Iscar CCMT 09T308	Планшайба
					точіння чистове	DMTG-VT30	Iscar CCMT 09T308	Планшайба
					точіння суперфінішне	DMTG-VT30	Sandvik CB7015 S01020	Планшайба
...								
22	30	торець	9	5	точіння одноразове	DMTG-VT30	Iscar CCMT 09T308	Планшайба

Список літератури

- Богуслаев А. В. Прогрессивные технологии моделирования, оптимизации и интеллектуальной автоматизации этапов жизненного цикла авиационных двигателей: Монография / [А. В. Богуслаев, Ал. А. Олейник, Ан. А. Олейник, и др.]; под ред. А. В. Богуслаев. – Запорожье : ОАО Мотор Сич, 2009. – 468 с.
- Davim, J. P. Computational Methods for Optimizing Manufacturing Technology: Models and Techniques [Text] / J. P. Davim. – USA : IGI Global, 2012. – 395 p.
- Choudhuri, K. Multi-objective optimization in turning – using a Genetic Algorithm [Text] / K. Choudhuri, D. K. Pratihar, D. K. Pal // Journal of Institute of Engineers. – 2002. – Vol. 82. – pp. 37–44.
- Ковалевский С. В. Методы структуризации технологических процессов механической обработки деталей тяжелого машиностроения / С. В. Ковалевский, Е. В. Мишура // Захист металургійних машин від поломок: зб. наукових праць / ПДТУ. – Маріуполь, 2009. – Вип. 11. – С. 220–223.
- Макаров В. Н. Современное логическое программирование на языке Visual Prolog 7.5 / В. Н. Макаров. – СПб : БХВ-Петербург, 2016. – 544 с.

6. Blackburn Patrick. Learn Prolog Now! / Patrick Blackburn, Johan Bos. – Cambridge University Press, 2008. – 265 p.

References (transliterated)

1. Boguslaev, A. V., Oleinik, Al. A., Oleinik, An. A. *Progressivnye tekhnologii modelirovaniya, optimizatsii i intellektual'noi avtomatizatsii etapov zhiznennogo tsikla aviatsionnykh dvigatelei* [Progressive technologies of modeling, optimization and intelligent automation of the life cycle stages of aircraft engines]. Zaporozh'e, OAO Motor Sich Publ., 2009. 468 p.
2. Davim, J. P. *Computational Methods for Optimizing Manufacturing Technology: Models and Techniques* [Text]. J. P. Davim. USA, IGI Global, 2012. 395 p.
3. Choudhuri, K. *Multi-objective optimization in turning – using a Genetic Algorithm* [Text]. K. Choudhuri, D. K. Pratihar, D. K. Pal. Journal of Institute of Engineers. 2002. Vol. 82. pp. 37–44.
4. Kovalevskiy S. V. *Metody strukturizatsii tekhnologicheskikh protsessov mekhanicheskoy obrabotki detaley tyazheloego mashinostroeniya* [Methods of structuring technological processes of mechanical processing of heavy engineering parts]. S. V. Kovalevskiy, E. V. Mishura. *Zakhist metalurgiyikh mashin vid polomok: zb. naukovikh prats'.* PDTU. Mariupol', 2009. Vol. 11. pp. 220–223.
5. Makarov V. N. *Sovremennoe logicheskoe programmirovaniye na yazyke Visual Prolog 7.5* [Modern logical programming in Visual Prolog 7.5]. V. N. Makarov. SPb, BKhV–Peterburg, 2016. 544 p.
6. Blackburn Patrick. *Learn Prolog Now!* Patrick Blackburn, Johan Bos. Cambridge University Press, 2008. 265 p.

Надійшла (received) 13.10.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Синтез структури технологічних процесів обробки металів різанням / В. В. Лимаренко, І. П. Хавіна // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів машинобудуванні та металургії. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 35 (1257). – С. 39–43. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2519-2671

Синтез структуры технологических процессов обработки металлов резанием / В. В. Лимаренко, И. П. Хавина // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів машинобудуванні та металургії. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 35 (1257). – С. 39–43. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2519-2671

Synthesis of the structure of technological processes of cutting metal processing / V. V. Limarenko, I. P. Havina // Bulletin of the NTU "KhPI" : Innovative technologies and equipment of materials processing in engineering and metallurgy. – Kh.: NTU "KhPI", 2017. – No. 35 (1257). – P. 39–43. – Bibliogr.: 6. – ISSN 2519-2671

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Лимаренко Вячеслав Володимирович – ст. викладач кафедри обчислювальної техніки та програмування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», тел.: (094) 977-08-08; e-mail: slaw_lww@ukr.net.

Лимаренко Вячеслав Владимирович – ст. преподаватель кафедры вычислительной техники и программирования, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», тел.: (094) 977-08-08; e-mail: slaw_lww@ukr.net.

Limarenko Vyacheslav Vladimirovich – senior lecturer of the Chair of Computer Science and Programming, National Technical University «Kharkov Polytechnic Institute», tel.: (094) 977-08-08; e-mail: slaw_lww@ukr.net

Хавіна Інна Петрівна – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри обчислювальної техніки та програмування, e-mail: slaw_lww@ukr.net

Хавина Инна Петровна – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», профессор кафедры вычислительной техники и программирования, e-mail: inna.khavina25@gmail.com.

Khavina Inna Petrovna – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Associate Professor, National Technical University «Kharkov Polytechnic Institute», Professor of the Chair of Computer Science and Programming, e-mail: inna.khavina25@gmail.com

УДК 620.179.16: 620.179.17

С.Ю. ПЛЕСНЕЦОВ

ВИСОКОЕФЕКТИВНИЙ КОНТРОЛЬ ТРУБ ЕЛЕКТРОМАГНІТНО-АКУСТИЧНИМИ ПЕРЕТВОРЮВАЧАМИ

Розроблено новий метод контролю ультразвуковими імпульсами всього об'єму металу труб. Для реалізації цього методу розроблений електромагнітно-акустичний перетворювач нового типу, який дає можливість виявляти дефекти новим і традиційним методом та вимірювати товщину стінки об'єктів контролю. Розроблений електромагнітно-акустичний перетворювач працює в широкому діапазоні частот та амплітуд сигналу, що дозволяє ефективно виявляти дефекти на різних глибинах, з різними геометричними параметрами. Експериментальні дослідження трубних зразків підтвердили високу ефективність розробленого методу та нових ультразвукових безконтактних перетворювачів.

Ключові слова: труба, ультразвуковий контроль, ультразвуковий перетворювач, електромагнітно-акустичний, імпульс, дефект.

Разработан новый метод контроля ультразвуковыми импульсами всего объема металла труб. Для реализации этого метода разработан электромагнитно-акустический преобразователь нового типа, который дает возможность выявлять дефекты новым и традиционным методом и измерять толщину стенки объектов контроля. Разработанный электромагнитно-акустический преобразователь работает в широком диапазоне частот и амплитуд сигнала, что позволяет эффективно выявлять дефекты на разных глубинах, с разными геометрическими параметрами. Экспериментальные исследования трубных образцов подтвердили высокую эффективность разработанного метода и новых ультразвуковых бесконтактных преобразователей.

Ключевые слова: труба, ультразвуковой контроль, ультразвуковой преобразователь, электромагнитно-акустический, импульс, дефект.

A new method for controlling pipes with ultrasonic pulses of the total volume of metal is developed. For the implementation of this method, an electromagnetic acoustic converter of a new type has been developed, which makes it possible to detect defects by a new and traditional method and measure the thickness of the wall of control objects. The developed electromagnetic acoustic converter works in a wide range of frequencies and amplitudes of the signal, which allows to effectively detect defects at different depths, with different geometric parameters. The frequency range for developed electromagnetic acoustic transducer varies in the range from 0,5 to 6 MHz, and allows for measurement of wide array of tubular samples, allowing detection of both internal and surface defects. Accordingly wide array of defects can be detected, varying from cracks to air bubbles and caverns. Experimental studies of tube samples confirmed the high efficiency of the developed method and new ultrasonic noncontact transducers. Two transducers are used within given solution to generate and receive the signal, for further processing within hybrid analog/digital system. The magnetic field generated by first transducer emits the acoustic waves for the second transducer to register. Wave set registered includes straight, transverse and Rayleigh waves, which are echoed from defect and other elements of the sample, creating the image which allows to analyze the defect in complex form, including it's location and geometry.

Keywords: pipe, ultrasonic control, ultrasonic transducer, electromagnetic acoustic, pulse, defect.

Вступ. Промисловість України випускає та широко застосовує трубну продукцію. На частині труб, як і при виробництві, так і при експлуатації виникають поверхневі і внутрішні дефекти. Несвоєчасне їх виявлення може привести до аварій з значними матеріальними і людськими втратами. Особливо це стосується нафтогазової, енергетичної, хімічної промисловості. В промисловості використовуються труби зі значним діапазоном діаметрів, сортаменту сталі, товщини стінок. Це накладає на засоби контролю труб значні вимоги, підвищує їх технологічність та збільшує їх вартість.

Найбільш широке застосування для діагностики труб має ультразвуковий метод контролю [1]. Проте, контактний метод ультразвукового контролю (УЗК) не завжди забезпечує високу якість дефектоскопії. Це обумовлено необхідністю використання контактної рідини та виконувати спеціальну підготовку поверхні об'єкту контролю (ОК). В результаті погіршується екологічний стан довкілля, витрачається енергія та метал виробу, зношується інструмент, мають місце значні сумарні втрати часу на проведення контролю.

Вирішити цю проблему можливо за рахунок використання електромагнітно – акустичного контролю [2]. Але, незважаючи на те, що перші публікації про використання ЕМА способу з'явилися ще в 30-х роках двадцятого століття, до цього часу, незважаючи на суттєві переваги, багаторічний об'єм

його ефективного використання в промисловості, незначний. На сьогодні існує упереджене ставлення, що причинами обмеженого використання ЕМА способу є недостатня чутливість до дефектів, значні розміри, несучасні енергетичні показники [3]. Тому дослідження і розробки, направлені на підвищення можливостей ЕМА способу, в тому числі для виявлення дефектів поверхні, є актуальними.

Основна частина. Для виконання досліджень з удосконалення ЕМА способу було розроблено ЕМА перетворювачі нового покоління. В ультразвуковому роздільно-поєднаному електромагнітно-акустичному перетворювачі для контролю феромагнітних металовиробів, що має корпус та закріплені в ньому два джерела постійного магнітного поля, дві окремі плоскі високочастотні котушки індуктивності з робочими і неробочими ділянками, розміщені в неелектропровідних неферомагнітних основах. Одна, високочастотна котушка індуктивності, є збуджуючою, а друга – приймаючою. Високочастотні котушки захищені протектором. Робоча ділянка збуджуючої високочастотної котушки індуктивності виконана в вигляді рядом розташованих в площині витків провідників і розміщена між полюсом першого джерела поляризованого магнітного поля та металовиробом. Її неробоча ділянка – поза полюсом першого джерела поляризованого магнітного поля. Робоча ділянка приймаючої високочастотної

катушки індуктивності виконана у вигляді щільно упакованих провідників розміром менше довжини півхвилі акустичних коливань, які повинні збуджуватися в металовиробі, і розміщена між полюсом другого джерела поляризовуючого магнітного поля та металовиробом. Її неробоча ділянка – поза полюсом другого джерела поляризовуючого магнітного поля. При цьому відстань L між робочою ділянкою збуджуючої високочастотної катушки індуктивності і робочою ділянкою приймаючої високочастотної катушки індуктивності визначається за виразом

$$L \geq 1,2 \cdot C \cdot (t_3 + t_p),$$

де C – швидкість розповсюдження ультразвукової зсувної, поздовжньої або поверхневої хвилі Релея;

t_3 – тривалість зонduючого ультразвукового імпульсу;

t_p – тривалість перехідних процесів після впливу зонduючого імпульсу на блоки приладу контролю.

На рис. 1 наведена схематичне зображення ультразвукового роздільно поєднаного електромагнітно-акустичного перетворювача нового

типу для контролю феромагнітних металовиробів, його розміщення на ОК та елементи для пояснення його роботи.

На рис. 1 позначені елементи ЕМАП: 1 – корпус; 2 – перше джерело постійного поляризовуючого магнітного поля; 3 – друге джерело постійного магнітного поля; 4 – приймаюча високочастотна катушка індуктивності з робочою 6 та неробочою 8 ділянками; 5 – збуджуюча високочастотна катушка індуктивності з робочою 7 та неробочою 9 ділянками; приймаюча високочастотна катушка 4 індуктивності розміщена в неелектропровідній неферомагнітній основі 10; збуджуюча високочастотна катушка 5 індуктивності розміщена в неелектропровідній неферомагнітній основі 11; 12 – протектор; 13 і 14 – з'єднувачі, які можуть бути виконані в одному елементі; 15 і 16 – з'єднувальні провідники; 17 – вісь, яка зв'язує корпуси збуджуючої та приймаючої частини ЕМАП; ОК – об'єкт контролю.

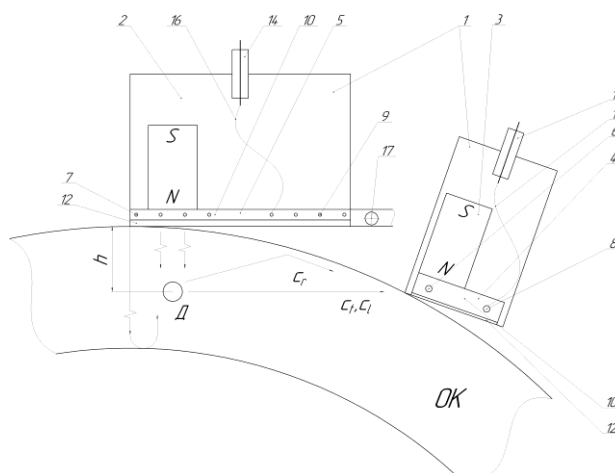


Рис. 1 – Ескізне зображення ЕМАП нового типу на поверхні ОК

ЕМАП функціонує наступним чином. ЕМАП, який має корпуси 1, розташовують на поверхні ОК, як це зображено на фіг.1 так, щоб протектори 12 прилягали до поверхні ОК, захищаючи елементи ЕМАП від пошкоджень. Джерело 2 постійного поляризовуючого магнітного поля створює в поверхневому шарі феромагнітного ОК поляризоване магнітне поле, силові лінії якого нормальні його поверхні. Імпульси високочастотного струму живлять високочастотну катушку 5 через роз'єм 14 і провідник 16, яка відповідно генерує електромагнітне поле. Взаємодія електромагнітного поля і магнітного поля в поверхневому шарі ОК проходить тільки під полюсом джерела 2 постійного поляризовуючого магнітного поля, під яким розташована робоча ділянка 7 високочастотної катушки 5 і не проходить під неробочою ділянкою 9 високочастотної катушки 5. В результаті, в ОК збуджуються акустичне поле

імпульсів поперечних хвиль, які розповсюджуються нормально поверхні вглиб виробу зі швидкістю C_t . Основи 10 виготовлені з неелектропровідного і неферомагнітного матеріалу і необхідні для фіксації високочастотних катушок 4 і 5.

Якщо в зоні збудженого акустичного поля на глибині h буде знаходитися дефект D , то за рахунок дифракції та трансформації на його поверхні будуть збуджені хвилі різних типів. В результаті в поверхневому шарі металу ОК під полюсом другого джерела 3 поляризовуючого постійного магнітного поля можуть з'явитися три типи хвиль: поверхнева (Релея) зі швидкістю розповсюдження C_r , поперечна зі швидкістю розповсюдження C_t та поздовжня, зі швидкістю розповсюдження C_l . Взаємодія вказаних хвиль з магнітним полем другого джерела 3 збудить над поверхнею металу ОК електромагнітне поле. Це поле наведе ЕРС в робочій ділянці 6 приймаючої високочастотної катушки 4 індуктивності і не наведе

ЕРС в неробочій ділянці 8 приймаючої височастотної котушки 4 індуктивності. Виготовлення робочої ділянки 6 приймаючої височастотної котушки 4 індуктивності у вигляді щільно упакованих провідників розміром менше довжини півхвилі акустичних коливань, які повинні збуджуватися в металовиробі, гарантує прийом корисних сигналів усіх типів хвиль з максимальною амплітудою. Прийнятий імпульс, який несе інформацію про наявність дефекту D і його характеристики, через провідник 15 поступає на з'єднувач 13. Відстань L між робочою ділянкою 7 збуджуючої височастотної котушки 5 індуктивності і робочою ділянкою 6 приймаючої височастотної котушки 4 індуктивності визначається виразом

$$L \geq 1,2 \cdot C \cdot (t_3 + t_p),$$

де C – швидкість розповсюдження ультразвукової хвилі з найбільшою величиною її значення;

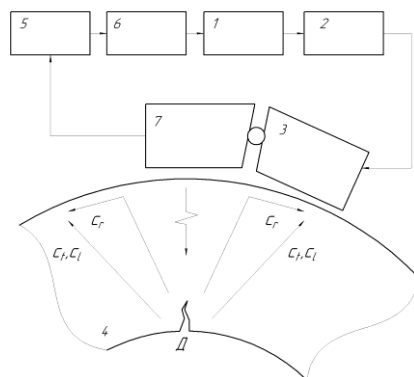
t_3 – тривалість зонduючого ультразвукового імпульсу;

t_p – тривалість перехідних процесів після впливу зонduючого імпульсу на блоки приладу ЕМАП контролю.

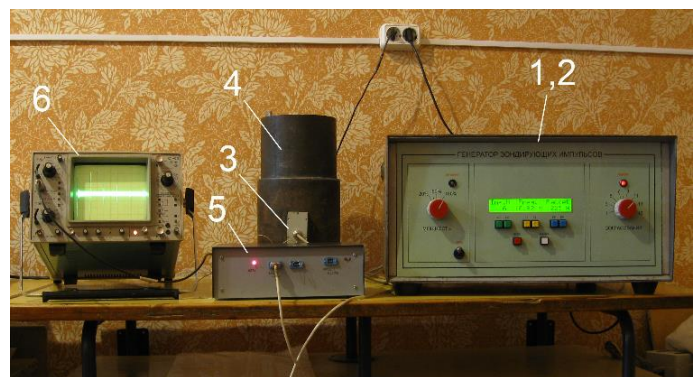
При такому встановленні величини L імпульс, який несе інформацію про дефект D , з'являється в часовій площині після закінчення перехідних процесів в елементах дефектоскопа і буде обов'язково зареєстрований приладом контролю. Експериментально встановлено, що розроблений ЕМАП нового покоління гарантує виявлення дефектів, які знаходяться на глибинах 0...30 мм від

поверхні ОК. Для дослідження можливостей ЕМА перетворювача нового типу виготовлено стенд, рис. 2. Він складається з формувача 1, який збуджує пакетний імпульс з заданою частотою заповнення, заданою тривалістю імпульсу та заданою частотою зондування. Вихідний імпульс блоку 1 посилюється широкосмуговим блоком 2, який формує збуджуючий сигнал з піковою потужністю до 90 кВт. Підсилений імпульс подається на збуджуючу частину (котушку індуктивності) роздільно суміщеного ЕМА перетворювача 3. У об'єкті контролю 4 збуджується зсувна хвиля, яка розповсюджується в поверхневому шарі ОК 4. Оскільки виробом є труба, то, при відсутності дефектів, імпульси зсувних хвиль, які досягли протилежної (внутрішньої) сторони труби відбиваються і приймаються тією ж котушкою ЕМАП. Це дає можливість вимірювати товщину ОК.

При наявності дефекту частина енергії імпульсу відбивається, дифрагує та трансформується і реєструється приймаючою частиною ЕМА перетворювача 7 після часу завершення дії зонduючого та перехідних імпульсів у блоках приладу. Прийнятий імпульс підсилюється вузькосмуговим малошумним попереднім підсилювачем 5, оброблюється та візуалізується на блоку 6. Робота блоку 6 синхронізована імпульсом формувача 1. Якщо товщина стінки труби значна, то при діагностиці можливо отримувати сигнал безпосередньо відбитий від дефекту. Тобто одночасно можливо проводити дефектоскопію традиційним луна методом.



а



б

Рис. 2 – Стенд для збудження і прийому ультразвукових імпульсів ЕМАП нового типу:

а – спрощена блок-схема стенду; б – зображення стенду

Для дослідження перетворювачів нового типу було використано частоти ультразвукових коливань в діапазоні 0,85... 5 МГц, імпульси часовою тривалістю 2...10 періодів частоти заповнення. Піковий струм в збуджуючих котушках ЕМАП досягав 120 А. Досліджено зразки труб різного діаметру, з різними товщинами стінки, виготовлених з різних матеріалів.

Ефективність роботи перетворювачів нового типу визначалось за максимальним відношенням амплітуд луна сигналу від дефекту до амплітуди завод. В якості дефектів використано моделі у вигляді пазів та свердлінь різного розміру. Умови проведення контролю та отримані результати наведено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Умови та результати контролю

Исследуемый объект	Дефект и его параметры: а – довжина, мм; в – рзкриття, мм; с – глибина, мм	Отношение амплитуд эхо сигнала и шума, раз	Расстояние от поверхности до дефекта, мм
1.Обточенная обсадная труба Ø 168 мм, стенка- 10,4 мм (сталь по ГОСТ 632-80)	Продольный прямоугольный паз а=16 мм, в=0,3 мм и с=0,82 мм на наружной поверхности	42	0
" – "	то же на внутренней поверхности	41	толщина стенки
" – "	отверстие диаметром 1,3 мм в середине стенки глубиной 25 мм, просверлено вдоль образующей трубы	8	1/2 толщины стенки
2.Обсадная труба Ø 168 мм с муфтой Поверхность черновая. Стенка – 10,6 мм	продольный паз на наружной поверхности с а=16 мм, в=0,15 мм, с=0,8 мм	28	0
" – " на муфте	то же с а=16 мм, в=0,15 мм, с=0,6 мм	11,5	0
" – " на трубе	продольный паз на внутренней поверхности трубы с а=22 мм, в=0,15 мм, с=1 мм	38,9	толщина стенки
" – " на трубе	поперечный паз на наружной поверхности с а=12 мм в=0,15 мм, с=0,8 мм	32	0
3.Обсадная труба Ø168 мм, разнотолщинность стенки от 11,7 до 12,3 мм	продольный паз на наружной поверхности с а =120 мм; в=0, 15 и глубиной, мм: 1,20 1,05 0,83 0,56 0,37 0,22	53 48 46 40 33 21	0 0 0 0 0 0
" – "	поперечный паз на наружной поверхности с а=12,5 мм, в=0,15 мм, с=0,6 мм	28	0
" – "	продольный паз на внутренней поверхности с а=32 мм, в=0,15 мм, с=1,7 мм	50	толщина стенки
" – "	продольное отверстие в стенке диаметром 2 мм на глубину 34 мм	33	1/2 толщины стенки
4.Чугунная гильза для двигателей грузовиков Ø 132 мм, стенка – 7 мм	продольный паз на наружной поверхности с а=28 мм в=0,15 мм, с=0,3 мм	9,4	0
5.Труба сварная (по образующей) Ø 32 мм, стенка – 2 мм (сталь 3)	бесдефектный сварной шов	5,7	0
" – "	непровар в сварном шве длиной около 6 мм	11,8	0
6.Труба сварная (по образующей) Ø 28 мм, стенка – 1 мм (сталь 3)	продольный паз на наружной поверхности с а=21,5, в=0,2 мм, с=0,2 мм	7,7	0
7.Труба Ø 51,3 мм, стенка – 3,5 мм (сталь 45)	продольный паз на наружной поверхности с а=31 мм, в=0,15 мм, с=0,2 мм	54	0
" – "	то же на внутренней поверхности с а=40 мм, в=0,15 мм, с=0,2 мм	43	0
8.Труба Ø 32 мм, толщина стенки -6,3 мм (легированная сталь)	естественная трещина на наружной поверхности с а ≈ 34 мм, в < 0,1 мм, с ≈ 0,2 мм	8,6	0
" – "	то же на внутренней поверхности с а ≈ 18 мм, в < 0,1 мм, с ≈ 0,4 мм	28	0
9.Труба Ø 17 мм, стенка-3,5 мм (легированная сталь)	естественная трещина на наружной поверхности по всей длине, в< 0,1 мм, с ≈ 0,2 мм	6	0
10.Труба Ø 24 мм, стенка – 2,5 мм (легированная сталь)	естественная трещина на наружной поверхности по всей длине с в < 0,1 мм, с ≈ 0,2 мм	8	0

Висновки. Аналіз наведених результатів виконаних розробок і досліджень дає можливість зробити висновок про те, що при контролі труб ЕМАП нового типу забезпечується виявлення дефектів, які

розташовуються на внутрішній і зовнішній поверхнях стінок труби, а також розташованих в тілі ОК. На поверхні труб без зварних ділянок з допомогою ЕМАП без спеціальної підготовки поверхні впевнено виявляються дефекти в вигляді моделей тріщини глибиною 0,2 мм і більше, а також внутрішні дефекти в стінці труби, еквівалентні отвору діаметром більше 1,3 мм.

ЕМАП нового типу дозволяє одночасно з новим методом контролю виявляти дефекти традиційним методом та вимірювати товщину стінки труби.

Список літератури

1. Ермолов И.Н. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. Под общ. ред. В.В. Клюева. Т.3: Ультразвуковой контроль / И.Н. Ермолов, Ю.В. Ланге. – М.: Машиностроение, 2004. – 864 с.- ISBN 5-217-03224-3 (Т3).
2. Судакова К.В. О повышении эффективности контроля качества металлургической продукции. / К.В. Судакова, И.Л. Казюкевич. – В мире неразрушающего контроля. – 2004. – №3. – С. 8–10.
3. Мигущенко Р.П. Теория и практика электромагнитно-акустического контроля. Часть 5. Особенности конструирования и практического применения ЭМА устройств

ультразвукового контроля металлоизделий. / Р.П. Мигущенко, Г.М. Сучков, О.Н. Петрищев, А.В. Десятниченко Монография. Харьков: ТОВ «Планета-принт», 2016 – 230 с.

References (transliterated)

1. Ermolov I.N. *Nerazrushayushchiy kontrol: Spravochnik: V 7 t. Pod obshch. red. V.V. Klyuyeva. T.3: Ultrazvukovoy kontrol* [Nondestructive testing: Handbook: In 7 tons. Under general. Ed. V.V. Klyuev. V3: Ultrasonic testing] / I.N. Ermolov, Yu.V. Lange. – Moscow: Mashinostroyeniye. 2004. – 864 p.- ISBN 5-217-03224-3 (T3).
2. Sudakova K.V. *O povyshenii effektivnosti kontrolya kachestva metallurgicheskoy produktsii* [On quality testing efficiency increase for metallurgic product] / K.V. Sudakova, I.L. Kazyukevich. – V mire nerazrushayushchego kontrolya. – 2004. – No3. – P. 8–10.
3. Migushchenko R.P. *Teoriya i praktika elektromagnitno-akusticheskogo kontrolya. Chast 5. Osobennosti konstruirovaniya i prakticheskogo primeneniya EMA ustroystv ultrazvukovogo kontrolya metalloizdeliy* [Theory and practice of electromagnetic-acoustic control. Part 5. Features of designing and practical application of EMA devices for ultrasonic inspection of metal products] / R.P. Migushchenko, G.M. Suchkov, O.N. Petrishchev. A.V. Desyatnichenko Monografiya. Kharkov: TOV "Planeta-print". 2016 – 230 p.

Поступила (received) 11.10.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Високоєфективний контроль труб електромагнітно-акустичними перетворювачами / Плєснецов С.Ю. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – №35(1257). – С. 44–48 – Библиогр.: 3 назви. – ISSN 2519-2671

Высокоэффективный контроль труб электромагнитно-акустическими преобразователями / Плєснецов С.Ю. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – №35(1257). – С. 44–48 – Библиогр.: 3 назви. – ISSN 2519-2671

Highly effective electromagnetic-acoustic transducer pipe testing // S.Yu. Plesnetsov // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Innovative technologies and equipment of materials processing in engineering and metallurgy. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2017. – No 35(1257). – P. 44–48. – Bibl.:6. – ISSN 2519-2671

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Плєснецов Сергій Юрійович – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри «Комп'ютерні та радіоелектронні системи контролю та діагностики», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», тел.: (050) 841-30-09; e-mail: s.plesnetsov@gmail.com.

Плєснецов Сергей Юрьевич – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Компьютерные и радиоэлектронные системы контроля и диагностики», Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», тел.: (050) 841-30-09; e-mail: s.plesnetsov@gmail.com.

Plesnetsov Sergey Yuriyovich – PhD, Senior Lecturer of the Department "Computer and Radioelectronic Systems for Testing and Diagnostics", National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", tel.: (050) 841-30-09; e-mail: s.plesnetsov@gmail.com.

*Ю.А. ПЛЕСНЕЦОВ, А.Н. ХРИСТИЧЕНКО, Е.Н. ХРИСТИЧЕНКО***РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА
ПРОФИЛЕЙ ПЕРЕМЕННОГО СЕЧЕНИЯ**

Проведен теоретический анализ деформированного состояния металла профилей переменного по длине сечения, получены аналитические зависимости для определения компонент перемещений и деформаций. Для обеспечения практических расчетов по полученным теоретическим зависимостям определены закономерности изменения суммарного угла подгибки по длине очага деформации, которые наиболее полно характеризуют формоизменение заготовки в процессе профилирования. Уточнены длина и форма очага деформации. Разработан технологический процесс изготовления профилей переменного по длине сечения с использованием обычных профилегибочных станков, предполагающий применение специального формирующего и направляющего устройства, особенностью которого является смещение элементов валков вдоль осей рабочих валов при профилировании участка переменного сечения. Выполнены экспериментальные исследования формоизменения металла в очаге деформации и энергосиловых параметров технологического процесса. В работе установлено, что усилие смещения и требуемая мощность привода значительно увеличиваются с увеличением толщины заготовки и угла подгибки за проход и снижаются с уменьшением перепада ширины стенки и увеличением длины участка переменного сечения, а также с уменьшением трения при смещении подвижных элементов по валу.

Ключевые слова: профиль переменного по длине сечения, технология производства, деформированное состояние металла, очаг деформации, энергосиловые параметры технологического процесса.

Проведено теоретичний аналіз деформованого стану металу профілів змінного по довжині перетину, отримано аналітичні залежності для визначення компонент переміщень і деформацій. Для забезпечення практичних розрахунків за отриманими теоретичними залежностями визначено закономірності зміни сумарного кута підгинання по довжині осередку деформації, які найбільш повно характеризують формозміну заготовки в процесі профілювання. Уточнені довжина і форма осередку деформації. Розроблено технологічний процес виготовлення профілів змінного по довжині перетину з використанням звичайних профілезгинальних станів, що передбачає застосування спеціального формируючого і направляючого пристрою, особливістю якого є зміщення елементів валків уздовж осей робочих валів при профілюванні ділянки змінного перерізу. Виконано експериментальні дослідження формозміни металу в осередку деформації і енергосилових параметрів технологічного процесу. У роботі встановлено, що зусилля зсуву і необхідна потужність привода значно збільшуються зі збільшенням товщини заготовки і кута підгинання за проход і знижуються зі зменшенням перепаду ширини стінки і збільшенням довжини ділянки змінного перерізу, а також зі зменшенням тертя при зміщенні рухомих елементів по валу.

Ключові слова: профіль змінного по довжині перетину, технологія виробництва, деформований стан металу, осередок деформації, енергосилові параметри технологічного процесу.

A theoretical analysis of the deformed state of the metal of the profiles of a variable along the length of the section is carried out, and analytical dependences are obtained for determining the components of displacements and deformations. To ensure practical calculations on the theoretical dependencies obtained, the regularities of the change in the total angle of the bend along the length of the deformation center are determined, which most fully characterize the shaping of the workpiece during the profiling process. The length and shape of the deformation focus are specified. A technological process for manufacturing profiles of variable cross section length using conventional roll forming machines is proposed, which assumes the use of a special shaping and guiding device, the feature of which is the displacement of the roll elements along the axes of the working rolls when profiling a section of variable cross-section. Experimental studies of metal shaping in the deformation zone and energy-force parameters of the technological process are performed. It is established in the work that the biasing force and the required drive power increase significantly with increasing thickness of the workpiece and the angle of the bend per pass and decrease with decreasing wall width difference and increasing the length of the section of variable cross-section as well as with decreasing friction when moving elements move along the shaft.

Keywords: profile of variable cross-section length, production technology, deformed state of metal, deformation center, energy-force parameters of the technological process.

Введение. Большую часть сортамента профилей переменного сечения составляют профили типа швеллеров, ширина стенки которых изменяется по всей длине профиля или на некоторых его участках. К ним относятся, в частности, симметричные профили, стенка которых равномерно расширяется от переднего конца к заднему концу. Разработанный технологический процесс их изготовления на обычных профилегибочных станках предполагает применение специального формирующего и направляющего устройства, особенностью которого является смещение формирующих элементов валков вдоль осей рабочих валов при профилировании участка переменного сечения.

Актуальность темы. Теоретические и экспериментальные исследования влияния различных технологических схем и приёмов формовки на

энергосиловые параметры процессов валковой формовки новых типов гнутых профилей безусловно важны и актуальны для создания нового профилегибочного оборудования.

Проектирование нового и модернизация существующего профилегибочного оборудования позволит расширить сортамент и вывести производство гнутых профилей в Украине на более высокий уровень. Первоочередной является потребность в профилях переменного сечения из заготовок толщиной 3–8 мм.

Методика проведения исследований. Теоретический анализ выполнен с использованием уравнений течения вязких механики сплошных сред [1–4], в результате чего получено поле скоростей перемещений металла в очаге деформации. Экспериментальные исследования формоизменения

выполнены с использованием метода слепков очага деформации, энергосиловых параметров – с использованием метода тензометрии [5].

Основные результаты исследований.

Особенности процесса формовки профилей переменного сечения в винтовых калибрах. Сущность разработанного процесса формовки профилей переменного сечения заключается в предварительной формовке из листовой заготовки трапецевидной формы U-образного профиля с последующей его переформовкой в профиль заданной конфигурации [6–8]. Переформовка может быть произведена в 3–4 клетях стана, имеющего валки с винтовыми калибрами (рис. 1).

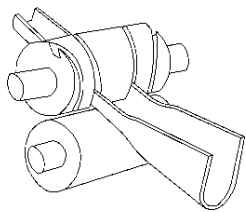


Рис. 1 – Схема переформовки U-образного профиля в валках с винтовыми калибрами

В процессе формовки U-образного профиля происходит обычный изгиб по дуге заданного радиуса, который описывается уравнениями метода механики сплошных сред (полем скоростей перемещений).

Рассмотрим процесс переформовки U-образного профиля в профиль швеллерного типа. Анализ геометрии поперечного сечения промежуточного и конического профилей, а также процесса

формоизменения показывает, что в общем случае при образовании каждого из участков сечения готового профиля происходит изменение формы сечения с одновременным его переходом из одного положения в другое (рис. 2).

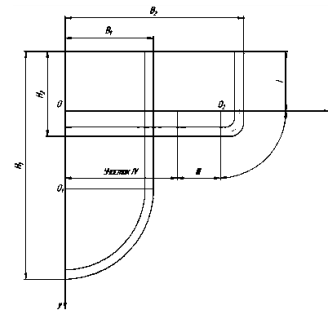


Рис. 2 – Схема для анализа процесса перехода U-образного сечения в сечение профиля швеллерного типа

Разобьем сечение профиля на четыре характерных участка (I, II, III, IV), формоизменение которых в совокупности определяет процесс переформовки. При определении длины участков принимаем, что в ходе формоизменения длина средней линии не изменяется.

Участок I (рис. 3, а) в процессе формовки полка смещается в направлении, перпендикулярном продольной оси заготовки; ось сечения остается прямоугольной, то есть сечение не претерпевает формоизменения. Таким образом, определение поля скоростей перемещений на участке сводится к определению компоненты V_x .

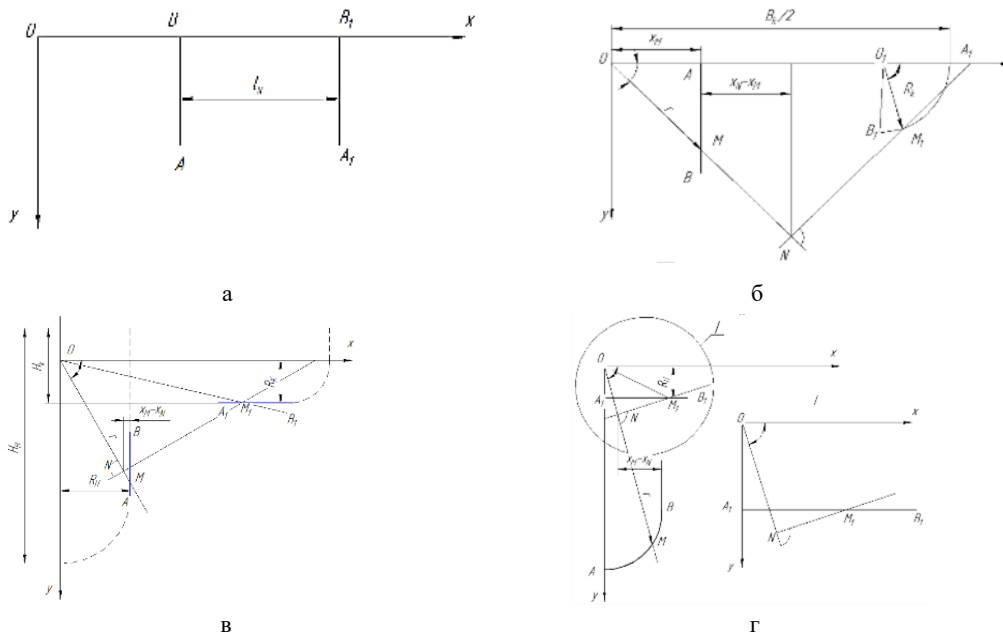


Рис. 3 – Расчетная схема к определению поля скоростей перемещений по участкам профиля: а – участок I смещается в направлении, перпендикулярном продольной оси заготовки (ось сечения остается прямоугольной); б – участок II подвергается изгибу с одновременным смещением вдоль оси Ox образуя зону соответствующую месту изгиба готового профиля; в – участок III сохраняет свою форму и перемещается из начального положения в конечное, оставаясь прямолинейным; г – участок IV при переформовке подвергается разгибу с одновременным смещением вдоль оси Oy

При переформовке все точки участка смещаются по оси Ox на величину l_x . Следовательно,

$$V_x = \frac{l_x}{t_{\Pi}}, \quad (1)$$

где t_{Π} – время перехода участка из исходного положения в конечное.

В любом поперечном сечении профиля

$$l_x = L_{\Pi} \cdot \operatorname{tg} \gamma, \quad (2)$$

где L_{Π} – длина участка переменного сечения;

γ – угол между кромкой профиля и ее положением на исходной заготовке (угол конусности профиля).

Время перехода кромки заготовка из исходного положения в конечное равно времени формовки участка переменного сечения, то есть

$$t_{\Pi} = \frac{L_{\Pi}}{V_{\Pi}},$$

где V_{Π} – скорость профилирования.

Таким образом, поле скоростей перемещений для первого участка примет вид

$$V_x = V_{\Pi} \cdot \operatorname{tg} \gamma; V_y = 0; V_z = 0. \quad (3)$$

Участок II (рис. 3, б) при переформовке полка подвергается изгибу с одновременным смещением вдоль оси Ox образуя, в конечном счете, участок, соответствующий месту изгиба готового профиля.

Радиальное перемещение произвольной точки M начального положения участка AB будет соответствовать отрезку MN .

Находим координаты точки N :

$$x_N = \frac{y_{M1} - x_{M1} \cdot K_2}{K_1 - K_2}, \quad (4)$$

где $K_1 = \operatorname{tg} \varphi$;

$K_2 = \operatorname{ctg} \varphi$.

После преобразования получаем

$$x_N = y_{M1} \cdot \cos \varphi \cdot \sin \varphi + x_{M1} \cdot \cos^2 \varphi \quad (5)$$

Координаты точки M_1 находим из геометрических соотношений:

$$x_{M1} = \frac{B_k}{2} - R_k + R_k \cdot \cos \alpha; y_{M1} = R_k \cdot \sin \alpha, \quad (6)$$

где B_k – ширина готового профиля;

R_k – радиус места изгиба профиля;

γ – центральный угол места изгиба, соответствующий рассматриваемой точке.

Из условия постоянства длины средней линии сечения профиля следует, что

$$AM = l_{M1A1},$$

где $AM = r \sin \varphi$;

$l_{A1M1} = r \alpha$;

r, φ – текущие значения координат;

$\rho = \left(R_n - \frac{S_0}{2} \right)$ – радиус нейтральной линии;

R_n – наружный радиус места изгиба;

S_0 – толщина заготовки.

Отсюда

$$\alpha = \frac{r}{\rho} \sin \varphi. \quad (7)$$

С целью упрощения выражений запишем тригонометрические функции $\sin \alpha$ и $\cos \alpha$ в виде степенного ряда, ограничившись первыми двумя его членами:

$$\sin \alpha = \alpha - \frac{\alpha^3}{6}; \cos \alpha = 1 - \frac{\alpha^2}{2} \quad (8)$$

После преобразований выражения (6) с учетом (7) и (8) примут вид

$$\begin{aligned} x_{M1} &= \frac{B_k}{2} - R_k \cdot \frac{r^2}{2\rho^2} \cdot \sin^2 \varphi; y_{M1} = \\ &= R_k \left(\frac{r}{\rho} \sin \varphi - \frac{r^3}{6\rho^3} \cdot \sin^3 \varphi \right) \end{aligned} \quad (9)$$

Подставляя (9) в (5), получим

$$\begin{aligned} x_N &= R_k \left(\frac{r}{\rho} \sin \varphi - \frac{r^3}{6\rho^3} \sin^3 \varphi \right) \cos \varphi \sin \varphi + \\ &+ \left(\frac{B_k}{2} - R_k \frac{r^2}{2\rho^2} \cdot \sin^2 \varphi \right) \cos^2 \varphi \end{aligned} \quad (10)$$

Длина отрезки MN

$$l_{MN} = \frac{x_N - x_M}{\cos \varphi} \quad (11)$$

Подставляем (10) в (11) и учитывая, что

$$x_M = r \cos \varphi,$$

получим:

$$\begin{aligned} l_{MN} &= \left(1 - \frac{r^2}{6\rho^2} \sin^2 \varphi - \frac{r}{2\rho} \cos \varphi \right) \cdot R_k \frac{r}{\rho} \sin^2 \varphi - \\ &- r + \frac{B_k}{2} \cos \varphi \end{aligned} \quad (12)$$

С учетом того, что

$$1 \gg \frac{r^2}{6\rho^2} \sin^2 \varphi \gg \frac{r}{2\rho} \cos \varphi,$$

представим выражение (12) в окончательном виде

$$l_{MN} = \left(1 - \frac{r}{2\rho} \cos \varphi \right) R_k \frac{r}{\rho} \sin^2 \varphi - r + \frac{B_k}{2} \cos \varphi. \quad (13)$$

Радиальная составляющая скорости перемещения точки M

$$V_r = \frac{l_{MN}}{t_{\Pi}}. \quad (14)$$

Окончательно получим

$$V_r = \frac{V_{\Pi}}{l_{\Pi}} \left[\left(1 - \frac{r}{2\rho} \cos \varphi \right) R_k \frac{r}{\rho} \sin^2 \varphi - r + \frac{B_k}{2} \cos \varphi \right]. \quad (15)$$

Из уравнения неразрывности

$$\frac{\partial V_r}{\partial r} + \frac{V_r}{r} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial V_{\varphi}}{\partial \varphi} = 0.$$

Определяем тангенциальную составляющую скорости V_φ :

$$V_\varphi = \frac{V_\Pi}{l_\Pi} \left[2r\varphi \left(1 - \frac{R_k}{2\rho} \right) + R_k \frac{r}{2\rho} \left(\sin 2\varphi + \frac{r}{\rho} \sin^3 \varphi \right) - \frac{B_k}{2} \sin \varphi \right] + C. \quad (16)$$

Постоянная интегрирования C определяется из граничных условий:
при $\varphi=0$

$$V_\varphi=0,$$

и, следовательно

$$C=0.$$

Третья составляющая поля скоростей (аксиальная)

$$V_z=0. \quad (17)$$

Участок III (рис. 3, в) сохраняет свою форму, оставаясь прямолинейным, и перемещается из начального положения в конечное положение.

Определяем поле скоростей перемещения точек участка аналогично предыдущему.

Из геометрических соотношений

$$x_N = y_{M1} \cos \varphi \sin \varphi + x_{M1} \cdot \cos^2 \varphi; \quad x_{M1} = x_{A1} + AM; \quad (18)$$

$$x_{A1} = \frac{\pi}{2} \cdot \rho_1, \quad (19)$$

где $\rho_1 = R_H - \frac{S_0}{2}$;

R_H – радиус места изгиба U-образной заготовки;

$$AM = \Delta h - R_H + R_k - r \cdot \sin \varphi, \quad (20)$$

где $\Delta h = H_H - H_k$;

H_H – высота U-образной заготовки;

H_k – высота готового профиля.

С учетом (19), (20) и рис. 3, в

$$x_{M1} = \frac{\pi \rho_1}{2} + \Delta h - R_H + R_k - r \cdot \sin \varphi; \quad y_{M1} = R_k. \quad (21)$$

Тогда выражение (18) примет вид

$$x_N = R_k \cdot \cos \varphi \cdot \sin \varphi + \left(\frac{\pi \rho_1}{2} + \Delta h - R_H + R_k - r \cdot \sin \varphi \right) \cdot \cos^2 \varphi. \quad (22)$$

В соответствии с рис. 3, в и (21)

$$l_{MN} = r - R_k \cdot \sin \varphi - \left(\frac{\pi \rho_1}{2} + \Delta h - R_H + R_k - r \cdot \sin \varphi \right) \cos \varphi. \quad (23)$$

Выражение для радиальной составляющей скорости V_r на основании (14), для тангенциальной V_φ – на основании выражений для V_r с учетом уравнения неразрывности.

Поле скоростей перемещений для участка III будет иметь вид:

$$V_r = \frac{V_\Pi}{l_\Pi} \left[r \cdot R_k \cdot \sin \varphi - \left(R_H + R_k - r \cdot \sin \varphi + \frac{\pi \rho_1}{2} \right) \cos \varphi \right];$$

$$V_\varphi = \frac{V_\Pi}{l_\Pi} \left[\left(\Delta h - R_H + R_k + \frac{\pi \rho_1}{2} \right) \sin \varphi - R_k \cdot \cos \varphi - 2 \cdot \varphi + \frac{r}{2} \cos 2\varphi \right];$$

$$V_z = 0. \quad (24)$$

Участок IV (рис. 3, г) при переформовке подвергается разгибу с одновременным смещением вдоль оси Oy .

Аналогично предыдущему расчету

$$x_N = y_{M1} \cos \varphi \sin \varphi + x_{M1} \cos^2 \varphi. \quad (25)$$

Подставив в (25)

$$x_{M1} = R_k \frac{r}{\rho} \left(\frac{\pi}{2} - \varphi \right);$$

$$y_{M1} = R_k,$$

получим

$$x_N = R_k \cos \varphi \sin \varphi + R_k \frac{r}{\rho} \left(\frac{\pi}{2} - \varphi \right) \cos^2 \varphi. \quad (26)$$

Из очевидных геометрических соотношений

$$l_{MN} = r - R_k \sin \varphi - R_k \frac{r}{\rho} \left(\frac{\pi}{2} - \varphi \right) \cos \varphi. \quad (27)$$

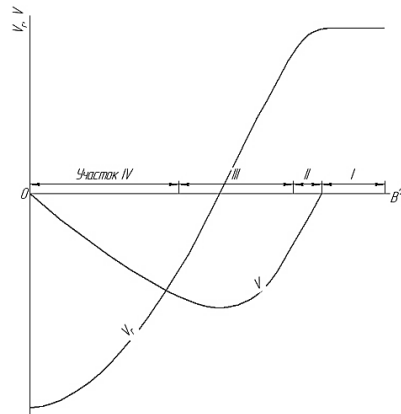
Используя (17) и уравнение неразрывности, получаем поле скоростей перемещений

$$V_r = \frac{V_\Pi}{l_\Pi} \left[r - R_k \sin \varphi - R_k \frac{r}{\rho} \left(\frac{\pi}{2} - \varphi \right) \cos \varphi \right];$$

$$V_\varphi = \frac{V_\Pi}{l_\Pi} \left[2r\varphi \left(1 + \frac{R_k}{\rho} \sin \varphi \right) - R_k \frac{r}{\rho} (\pi \sin \varphi - \cos \varphi) + R_k \cos \varphi \right];$$

$$V_z = 0. \quad (28)$$

Распределение радиальной составляющей V_r и тангенциальной составляющей V_φ скорости перемещения частиц металла по участкам швеллера с переменной по длине профиля шириной стенки показано графически на рис. 4. Оно соответствует кинематическим представлением о реальном процессе формоизменения заготовки до получения конечной формы готового профиля. Из рисунка видно, что радиальная составляющая V_r имеет максимальное по модулю значение на оси симметрии профиля, затем ее абсолютное значение уменьшается до нуля (на участке III). Далее радиальная скорость изменяет направление и увеличивается до границы с участком I, где она становится постоянной и равной скорости перемещения полки профиля V_x . Тангенциальная составляющая V_φ изменяется от нуля на оси симметрии до максимального значения в точке, где $V_r=0$, с последующим уменьшением до нулевого значения на границе I и II участков.

Рис. 4 – Розподілення радіальної V_r і тангенціальної V_ϕ складових швидкості переміщення по ширині заготовки

Експериментальні дослідження формоизменения профилей переменного сечений.

Определение функции $\alpha_c(z)$ для точек полки на участке переменного сечения – сложная задача, поскольку для получения полной картины формоизменения необходимо описать эту функцию для различных сечений рассматриваемого участка (как минимум для двух граничных и хотя бы одного между ними), а затем рассматривать совокупность полученных графиков. Чем больше сечений будет рассмотрено, тем полнее будет отображено реальное формоизменение».

В то же время ряд экспериментов показал, что на начальном этапе целесообразно установить характер распределения угла подгибки по длине участка переменного сечения в момент, когда этот участок полностью находится в очаге деформации.

Форму и размеры сечений профиля (без снятия упругой деформации после его извлечения из валков) определяли методом слепков. Для получения слепков использовали жидкий раствор пластмассы АСТ-Т. После затвердевания слепок извлекали из профиля и разрезали на темплеты шириной 20 мм. Далее конфигурацию сечения переносили на бумагу, проводили анализ геометрии переходных форм профиля и измеряли суммарные углы подгибки:

α_1 – прямой полки,

α_2 – полки ломаной формы.

Рассматриваемый швеллер 200(250)х90х4 мм – типичный профиль переменного сечения. Он состоит из двух прямых участков (узкого и широкого) и расположенного между ними участка переменного сечения. Экспериментальные исследования показали, что характер формоизменения металла на участках постоянного сечения аналогичен наблюдаемому формоизменению на обычных профилях.

Наибольший интерес представляет процесс формоизменения на участке переменного сечения. Поэтому заготовку в данном эксперименте

затормаживали в тот момент, когда середина этого участка совпадала с осевой плоскостью валков, после чего заливали раствор АСТ-Т.

По слепкам очага деформации получены графики распределения углов подгибки α_1 и α_2 по длине участка переменного сечения в очаге деформации, которые приведены на рис. 5. Исходные данные для их построения получены путем статистической обработки результатов экспериментальных исследований методом малых выборок. Из анализа результатов экспериментальных исследований (см. рис. 5) следует, что общим для подгибаемых элементов является интенсивное увеличение угла подгибки перед осевой плоскостью валков и его дальнейшее увеличение за нею. Это согласуется с общими представлениями о поведении подгибаемых элементов в очаге деформации при обычном профилировании. Однако наличие участка переменного сечения вносит в процесс подгибки полки ломаной формы существенные особенности:

а) длина очага деформации этой полки на участке переменного сечения меньше, чем прямой полки, 480 мм и 540 мм, соответственно. Распространению деформации препятствуют участки перехода от переменных сечений к постоянным сечениям (с узкой и широкой стенкой), имеющие в плане поперечно-изогнутую конфигурацию и, вследствие этого, дополнительную жесткость;

б) на участках нагружения и разгрузки наблюдаются зоны, характерные только для участка переменного сечения. На участке возрастания угла подгибки перед осевой плоскостью валков, на расстоянии 190 мм от нее, имеется промежуточный максимум, соответствующий II граничному сечению между участками со стенкой переменной и постоянной (большей) ширины. Наличие данного максимума объясняется избытком металла на подгибаемом элементе в районе этого граничного сечения.

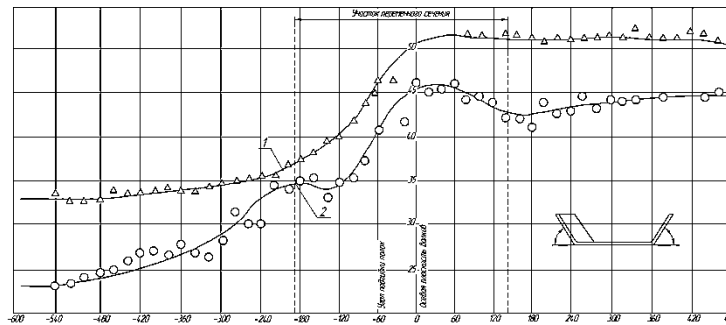


Рис. 5 – Распределение суммарного угла подгибки по длине участка переменного сечения при формовке швеллера 200(250)х90х4 мм в момент прохождения середины этого участка через осевую плоскость валков

За осевой плоскостью валков на расстоянии 150 мм от нее наблюдается минимум угла подгибки, после которого значение α_2 несколько возрастает и стабилизируется (участок плавного перехода заканчивается). Этот, минимум соответствует I граничному сечению между участками со стенкой переменной и постоянной (меньшей) ширины. Из-за недостатка металла в зоне этого сечения при профилировании здесь возникают дополнительные продольные деформации растяжения, вызывающие локальное уменьшение угла подгибки.

Анализ геометрии слепков и темплетов показал, что в процессе формовки полки профиля и стенка остаются прямолинейными в любом поперечном сечении, то есть формоизменение сводится к изменению кривизны мест изгиба и искривлению полок в продольном направлении.

Можно предположить, что любому произвольному сечению участка переменной ширины соответствует свой график функции $\alpha_2(z)$, не совпадающий другими. В то же время все эти графики

качественно аналогичны. Посредине их совокупности располагается график $\alpha_1(z)$. Крайние положения (нижнее и верхнее) занимают графики для сечений I и II, соответственно.

Определение энергосиловых параметров формовки профилей переменного сечения.

В соответствии с разработанной технологией, опробован способ формовки профилей переменного по длине сечения на профилегибочном стане, основанный на смещении формующих элементов валков вдоль осей рабочих валов при профилировании участка переменного сечения в соответствии с его формой. С этой целью формующие клетки снабжены механизмами смещения, основным рабочим органом которых является пара кулачок-ролик.

Для определения мощности привода механизмов смещения необходимо знать нагрузку, воспринимаемую кулачками в процессе профилирования. Она определяется усилием, необходимым для смещения подвижных элементов валков (рис. 6) вдоль рабочих валов.

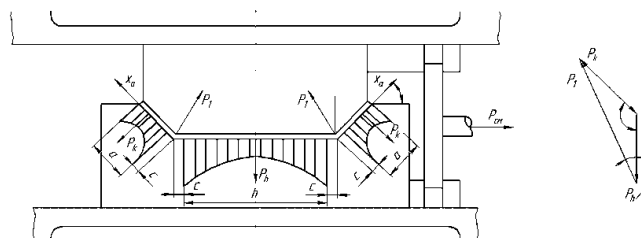


Рис. 6 – Схема для определения давлений металла на валки при формовке профилей переменного сечения

Поскольку профили переменного сечения большей частью представляют собой швеллеры с изменяющейся шириной стенки и, согласно разработанной технологии, для их изготовления требуются формующие валки с цилиндрическими и коническими элементами, считаем, что давление металла на валки и крутящие моменты на валках описываются в первом приближении известными выражениями, полученными для сортовых гнутых профилей:

– суммарное давление металла на коническую поверхность нижнего валка

$$P_k = \int_c^a \left(\frac{\sigma_s S^2}{4x} + 3,52 \cdot 10^{-4} E \alpha^{\frac{7}{5}} S^{\frac{13}{5}} a^{\frac{13}{5}} x \right) dx; \quad (29)$$

– суммарное давление на его цилиндрическую поверхность

$$P_h = \int_c^{h-c} \left(\frac{\sigma_s S^2}{4x} + 3,52 \cdot 10^{-4} E \alpha^{\frac{7}{5}} S^{\frac{13}{5}} h^{\frac{13}{5}} x \right) dx, \quad (30)$$

где a – ширина полки швеллера;

h – высота стенки (в расчетах величина принимаем равной длине образующей цилиндрического элемента нижнего валка);

c – расстояние от точки пересечения образующих конического и цилиндрического элементов нижнего валка до границ криволинейного участка;

α – угол подгибка полки за проход;

σ_s – предел текучести профилируемого материала;

E – модуль упругости материала;

s – толщина заготовки;

x – расстояние от точки пересечения образующих конического и цилиндрического элементов нижнего вала до рассматриваемой точки на полке;

– суммарное давление металла на верхний валок в местах изгиба

$$P_1 = \sqrt{P_k^2 + (0,5P_h)^2 + P_k P_h \cos \alpha_c}, \quad (31)$$

где α_c – суммарный угол подгибки полок в данном проходе;

– крутящие моменты на нижнем и верхнем валках

$$M_H = P_k R_k (f_c \sin \alpha_c + f_k \cos \alpha_c) + \frac{f_k P_h R_{OH}}{2}; \quad (32)$$

$$M_B = f_k P_1 \cos \gamma R_{OB}, \quad (33)$$

где R_k – радиус конического элемента вала в сечении, проходящем через точку приложения силы;

R_{OH} , R_{OB} – основные радиусы нижнего и верхнего валков;

f_c , f_k – коэффициенты трения скольжения и качения с проскальзыванием.

Зная указанное давление в моменты, можно определить усилие, необходимое для смещения формирующих элементов в процессе профилирования. При этом следует учитывать, что смещаемая часть в рассматриваемом случае составляет половину вала.

В общем виде:

$$P_{CM} = P_{CM-H} + P_{CM-B}, \quad (34)$$

где P_{CM-H} , P_{CM-B} – усилия, необходимые для смещения формирующих элементов нижнего и верхнего валков.

Силы, действующие на нижний и верхний валки (рис. 6).

$$P_{CM-H} = \frac{1}{2} \sum P_{TP-H} - P_k \sin \alpha_c; \quad P_{CM-B} = \frac{1}{2} \sum P_{TP-B} + P_1 \sin \gamma, \quad (35)$$

где $\gamma = \arctg \frac{P_k \sin \alpha_c}{0,5 P_k \cos \alpha_c}$ – угол, определяющий направление силы P_1 ;

$\frac{1}{2} \sum P_{TP-H}$, $\frac{1}{2} \sum P_{TP-B}$ – силы, необходимые для преодоления трения при смещении подвижных элементов нижнего и верхнего валков:

$$\frac{1}{2} \sum P_{TP-H} = \left(0,5 R_h + P_k \cos \alpha + 0,5 m_H g + R_{1H} + \frac{2 M_H}{d} \right) f_c;$$

$$\frac{1}{2} \sum P_{TP-B} = \left(P_1 \cos \gamma + 0,5 m_B g + R_{1B} + \frac{2 M_H}{d} \right) f_c. \quad (36)$$

На рис. 6 и в формулах используются следующие обозначения: m_H, m_B – массы нижнего и верхнего валков; $R_{1H}, R_{2H}, R_{1B}, R_{2B}, R_{1mB}, R_{2mB}$ – нормальные реакции на валках; d – диаметры валов.

Экспериментальные исследования энергосиловых параметров процесса формовки профилей переменного сечения. Экспериментальные исследования энергосиловых параметров профилирования позволяют не только определять их фактические величины, но и выяснять влияние на них технологических и геометрических параметров, способствуют выявлению предельных возможностей профилегибочного стана в целом и отдельных его узлов.

Экспериментальные исследования усилий на валках, крутящих моментов и усилия смещения при формовке швеллера переменного сечения 200(250)х90х4 мм проведено на профилегибочном стане.

Усилия на валках измеряли при помощи месдоз мембранного типа, установленных под нажимные винты рабочих клетей стана, по общеизвестной методике. Месдозы тариговали на эталонном прессе до и после замеров при ступенчатом нагружении через 500 кГ до предельного усилия 500 Т и строили тариговочные графики.

Крутящие моменты замеряли при помощи шпинделей с наклеенными под углом 45° к их оси тензодатчиками сопротивления. Для съема сигналов с вращающегося шпинделя использовали струнное токосъемное устройство. Шпиндели тариговали путем ступенчатого нагружения свободного конца рычага известной длины грузом известного веса с построением тариговочных графиков.

Усилие смещения формирующих элементов в процессе профилирования замеряли с помощью тензодатчиков, наклеенных на рычаг толкателя.

В качестве усилительной аппаратуры применяли тензостанцию. Для записи сигналов служил быстродействующий прибор Н-338-8. Суммарная погрешность измерительного канала и датчиков не превышала 10%.

Результаты расшифровки полученных данных об усилиях на валках, крутящих моментах и усилиях смещения по клетям стана приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Результаты замеров усилий на валках, усилий смещения по клетям стана и крутящих моментов

Клеть	1	2	3	4	5	6	7
Усилия, кН							
– суммарное на валках	12,67	4,29	26	18	25,28	25,31	19
– смещения	4,2	4,3	4,41	5,86	5,1	6,83	6
Крутящие моменты, Нм							
– на верхнем шпинделе	506	171	1040	720	1011	1012	760
– на нижнем шпинделе	253	103	780	360	506	506	380

Во всех клетях, кроме 2-й, вертикальная составляющая усилия на валках, со стороны прямой

полки больше, чем со стороны полки ломаной формы. Это объясняется отсутствием зазора между валками и

заготовкой, а также тем, что неподвижная часть калибра была закрытой буртами верхнего валка.

Неравномерность распределения усилий вызвана уменьшением зазора в калибрах во избежание проскальзывания валков по профилю. Так, уменьшение зазора в калибре 3-й клетки привело к росту усилия до 26 кН (что, впрочем, не превышает максимума, допустимого для данного стана, – 88,2 кН). По этой же причине повысились усилия в 5-й и 6-й клетях.

Усилие смещения валков (см. рис. 7) возрастает в промежуточных переходах до 5,86 кН, затем

снижается до 5,16 кН, а в двух последних переходах повышается до 6,83 кН (допустимая величина для стана равна 39,2 кН). Такой характер изменения объясняется тем, что во всех клетях, кроме двух последних, удалось осуществить разновременное смещение валков и практически исключить влияние поверхности профиля, препятствующей смещению валка, на участке, смежном с участком переменного сечения, а в последних двух переходах при существующей конструкции клеток полностью устранить влияние указанной поверхности оказалось невозможно.

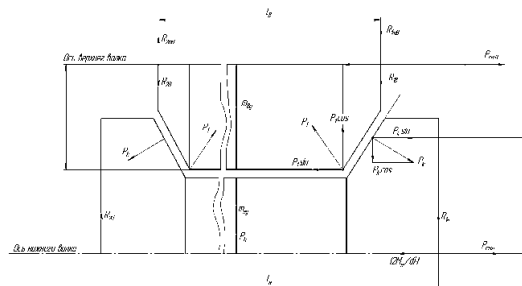


Рис. 7 – Схема для определения условия смещения формирующих элементов валков

Теоретический анализ энергосиловых параметров процесса их формовки показал, что при увеличении толщины заготовки с 4 мм до 8 мм усилия на валках увеличиваются в 1,8–2,1 раза, а усилия смещения – в 2,2–2,5 раза, но не выходят за пределы, допустимые для данного стана.

Согласно приведенным данным, изменение крутящих моментов на шпинделях аналогично изменению усилий на валках. Максимальный крутящий момент (на верхнем шпинделе 3-й клетки) равен 1040 Нм (максимальный допустимый – 2400 Нм).

Таким образом, максимальные усилия на валках, усилия смещения валков и крутящие моменты не превышают предельных допустимых. Энергосиловые параметры формовки заготовок толщиной 8 мм также находятся в пределах, допустимых для данного стана.

Поскольку рассматриваемые валки симметричны, а действующие на них силы равны и приложены также симметрично, то

$$R_{1B} = R_{2B}; R_{1H} = R_{2H}; R_{2mB} = \frac{1}{2} m_B \cdot g.$$

Из условия равновесия сил и моментов, действующих на верхний и нижний валки:

$$R_{1H} = R_{2H} = P_k \cos \alpha_c + \frac{1}{2} (m_H g + P_h); \quad (37)$$

$$R_{1B} = R_{2B} = P_1 \cos \gamma. \quad (38)$$

Подставим (37) и (38) в (36), а затем (36) в (35), получаем:

$$P_{см·H} = \left(P_h + 2P_k \cos \alpha_c + m_H g + \frac{2M_H}{d} \right) f - P_k \sin \alpha_c;$$

$$P_{см·B} = \left(2P_1 \cos \gamma + 0,5m_{B·g} + \frac{2M_B}{d} \right) f + P_1 \sin \gamma, \quad (39)$$

Суммарное усилие, необходимое для смещения формирующих элементов при формовке участка переменного сечения:

$$P_{см} = \left[P_h + 2P_k \cos \alpha_c + P_1 \cos \gamma + (m_H + 0,5m_B)g + 2 \frac{M_H + M_B}{d} \right] f + P_1 \sin \gamma - P_k \sin \alpha_c. \quad (40)$$

По зависимости (40) рассчитано усилие смещения в наиболее нагруженной клетке профилегибочного стана при производстве профилей переменного сечения с меньшей шириной стенки 200 мм, большей шириной стенки – 250 мм, высотой полки 90 мм, толщиной 4 мм. Материал – сталь Ст. 3. Расчетное усилие при угле подгибки за проход $\alpha = 16^\circ$ и суммарном угле подгибки $\alpha_c = 52^\circ$ равно 9520 Н. Около 70% этой величины составляют силы трения, около 20% – силы, возникающие при передаче крутящих моментов от вала к подвижным элементам.

Экспериментально установленные усилия на рычаге механизма смещения при профилировании в данной клетке составляют – 8300 Н (расхождение с расчетным значением составляет 12,8%), что свидетельствует о приемлемости выражения (40) для практических расчетов.

Для определения крутящего момента на валки кулачка рассмотрим схему действия сил, приложенных к кулачковому механизму (рис. 8). В качестве допущения принимаем, что силы, приложенные к кулачковому механизму, являются силами полезного сопротивления.

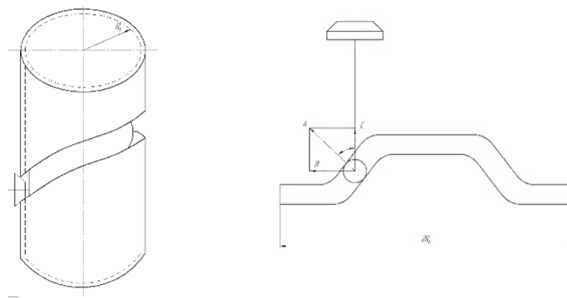


Рис. 8 – Схема для определения мощности привода механизма смещения

Пренебрегая силой инерции штанги, можно предположить, что равнодействующая сил, приложенных к штанге, равна:

$$C = P_{cm}. \quad (41)$$

Если пренебречь трением в паре кулачок-штанга, можно считать, что направление силы А давления кулачка на штангу совпадает с нормалью профиля кулачка, а силы В и С являются горизонтальной и вертикальной составляющими силы А. Отсюда, с учетом (36), находим движущий момент на валки кулачка:

$$M_d = P_{cm} t g \beta R_k, \quad (42)$$

где β – угол давления кулачкового механизма;

R_k – радиус среднего цилиндра кулачка.

Для определения мощности, снимаемой с вала кулачка, необходимо найти связь между скоростью движения полосы V_n и угловой скоростью кулачка.

Взаимосвязь между скоростью смещения инструмента (формирующих элементов валков) V_n и скоростью движения полосы V_n можно определить по зависимости:

$$V_n = \frac{(B_1 - B_2) \cdot V_n}{n \cdot l_k}, \quad (43)$$

где B_1, B_2 – большая и меньшая ширина стенки швеллера;

l_k – длина участка переменного сечения;

n – коэффициент симметрии относительно продольной оси профиля (для несимметричных профилей $n = 1$, для симметричных $n=2$).

Мощность, снимаемая со штанги кулачков:

$$N_k = V_n P_{cm}. \quad (44)$$

С учётом (43)

$$N_k = \frac{(B_1 - B_2) V_n}{n l_k} P_{cm}. \quad (45)$$

Тогда мощность привода электродвигателя определяется по зависимости:

$$N_{э.д} = \eta N_k, \quad (46)$$

где η – КПД привода.

Из (45) и (46) следует, что мощность привода механизма смещения прямо пропорциональна усилию смещения P_{cm} , скорости профилирования, а также перепаду ширины стенки профиля $(B_1 - B_2)$ и обратно пропорциональна длине участка переменного сечения l_k .

Анализ выражения (40) показывает, что усилие, необходимое для смещения, определяется в основном энергосиловыми параметрами процесса. Массой смещаемых элементов определяется лишь незначительная часть величины P_{cm} (6-8% общего усилия). С увеличением давления металла на валки и крутящих моментов возрастает и величина P_{cm} , причём на преодоление сил сопротивления смещению, возникающих от действия моментов M_b и M_n , требуется около 20% общего усилия. Это позволяет сделать вывод о возможности значительного сокращения требуемого усилия смещения валков (примерно в 1,25 раза) при использовании неприводных формирующих элементов.

На основании (40), (45), (46), а также с учетом сортамента профилей может быть произведен расчет мощности привода механизма смещения и силовой расчёт узлов этого механизма на стадии проектирования специализированного промышленного профилегибочного оборудования. Анализ указанных выражений, с учетом зависимостей для определения P_k, P_b, P_1, M_n и M_b , показывает, что на изменения условия смещения и требуемой мощности привода $N_{э.д}$ наибольшее влияние оказывают толщина и материал заготовки, режим формовки, точность изготовления и шероховатость поверхностей, по которым происходит смещение, а также конусность участка переменного сечения, характеризующая отношением $\frac{B_1 - B_2}{l_k}$. Усилие смещения и требуемая мощность привода значительно увеличиваются с увеличением толщины заготовки и угла подгибка за проход и снижаются с уменьшением перепада ширины стенки и увеличением длины участка переменного сечения, а также с уменьшением трения при смещении подвижных элементов по валу. Поскольку толщина и материал, а также геометрические параметры профиля определяются условиями его эксплуатации и не могут быть

изменены, при разработке технологии производства профилей переменного сечения следует предусматривать более мягкие режимы профилирования (угол подгибки за проход не более 12°), чем для аналогичных сортовых гнутых профилей постоянного сечения, во избежание громоздкости и излишней металлоемкости приводов и узлов механизма смещения валков.

При разработке сортамента профилей переменного сечения следует учитывать условия их работы в конструкциях и в соответствии с этими условиями выбирать минимальное возможное соотношение между перепадом ширины стенки профиля и длиной участка переменного сечения.

Выводы:

1. Экспериментальные исследования на профилегибочном стане показали возможность снижения энергозатрат в 1,25 раза при точной настройке стана, применение эффективных смазочных материалов, точном срабатывании механизмов смещения (при котором исключается переформовка участков профиля, смежных с участком переменного сечения), а также при высокой точности изготовления формирующих валков и исполнительных узлов механизмов смещения.

2. Полученное распределение $\alpha_c(z)$ можно использовать при аналитическом определении компонент деформированного состояния металла. Необходимы дальнейшие экспериментальные исследования для проверки аналитических зависимостей и получения дополнительных данных.

3. Располагая графиками распределения $\alpha_c(z)$ для возможно большего числа сечений рассматриваемого участка, можно получить реальную картину формоизменения и на ее основании определить уточненное напряженно-деформированное состояние металла.

4. Полученное поле скоростей перемещений позволяет определить напряженно-деформированное состояние металла и энергосиловые параметры процесса формовки симметричных профилей переменного сечения в винтовых калибрах, что обеспечивает разработку рациональной технологии формовки таких профилей и оптимальной конструкции формирующих валков.

5. При организации производства профилей переменного сечения полученное поле скоростей перемещений может быть использовано для расчета технологических параметров профилегибочного стана в зависимости от сортамента и геометрии профилей.

Список літератури

1. Седов Л.И. Механика сплошной среды. – Москва: Наука, 1983. – 540 с.
2. Ильющин А.А. Механика сплошной среды. / 3-е изд. – Москва: Изд-во МГУ, 1990. – 285 с.
3. Гун Г.Я. Математическое моделирование процессов обработки металлов давлением: учебное пособие для вузов. – Москва: Металлургия, 1983. – 285 с.
4. Тришевский, И.С. Теоретические основы процесса профилирования: монография / И.С. Тришевский, М.Е. Докторов. – Москва: Металлургия, 1980. – 287 с.
5. Чиченев Н.А. Методы исследования процессов обработки металлов давлением (экспериментальная механика) / Н.А. Чиченев, А. Б. Кудрин, П.И. Полухин. – Москва: Металлургия, 1977. – 312 с.
6. Тришевский И.С. Производство деталей из гнутых профилей / И.С. Тришевский, В.С. Марьин, В.А. Хмель. – Киев: Техніка, 1985. – 127 с.
7. Тришевский И.С. Калибровка валков для производства гнутых профилей проката: монография / И.С. Тришевский, В.И. Мирошніченко, В.П. Стукалов. – Киев: Техніка, 1980. – 168 с.
8. Тришевский И.С. Производство гнутых профилей. Оборудование и технология: монография / И.С. Тришевский, А.Б. Юрченко, В.С. Марьин. – Москва: Металлургия, 1982. – 384 с.

Bibliotafy (transliterated)

1. Sedov L.I. Mekhanika sploshnoy sredy. – Moscow: Nauka. 1983. – 540 p.
2. Ilyushin A.A. Mekhanika sploshnoy sredy. / 3-e izd. – Moscow: Izd-vo MGU. 1990. – 285 p.
3. Gun G.Ya. Matematicheskoye modelirovaniye protsessov obrabotki metallov davleniyem: uchebnoye posobiye dlya vuzov. – Moscow: Metallurgiya. 1983. – 285 p.
4. Trishevskiy, I.S. Teoreticheskiye osnovy protsessa profilirovaniya: monografiya / I.S. Trishevskiy. M.E. Doktorov. – Moscow: Metallurgiya. 1980. – 287 p.
5. Chichenev N.A. Metody issledovaniya protsessov obrabotki metallov davleniyem (eksperimentalnaya mekhanika) / N.A. Chichenev. A. B. Kudrin. P.I. Polukhin. – Moscow: Metallurgiya. 1977. – 312 p.
6. Trishevskiy I.S. Proizvodstvo detaley iz gnutykh profiley / I.S. Trishevskiy. V.S. Marin. V.A. Khmel. – Kiyev: Tekhnika. 1985. – 127 p.
7. Trishevskiy I.S. Kalibrovka valkov dlya proizvodstva gnutykh profiley prokata: monografiya / I.S. Trishevskiy. V.I. Miroshnichenko. V.P. Stukalov. – Kiyev: Tekhnika. 1980. – 168 p.
8. Trishevskiy I.S. Proizvodstvo gnutykh profiley. Oborudovaniye i tekhnologiya : monografiya / I.S. Trishevskiy. A.B. Yurchenko. B.C. Marin. – Moscow: Metallurgiya. 1982. – 384 p.

Надійшла (received) 13.11.2017

49ліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Разработка и исследование технологии производства профилей переменного сечения / Ю.А. Плесецов, А.Н. Христиченко, Е.Н. Христиченко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 35 (1257). – С. 50–59. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2519-2671

Розробка та дослідження технології виробництва профілів змінного перетину / Ю.О. Плесецов, А.М. Христиченко, Є.М. Христиченко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 35 (1257). – С. 49–59 – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2519-2671

Development and research of production technology of profiles of variable cross-section / Yu. A. Plesnetsov, A.N. Khristichenko, E.N. Khristichenko // Bulletin of the NTU "KhPI". Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy. – Kh.: NTU "KhPI", 2017. – No. 35 (1257). – P. 49–59. – Bibliogr.: 8. – ISSN 2519-2671

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Плесецов Юрій Олександрович – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, завідувач кафедри обробки металів тиском. Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», тел.: (097) 902-29-18; e-mail: plesnetsov@gmail.com.

Плесецов Юрий Александрович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, заведующий кафедрой обработки металлов давлением. Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», тел.: (097) 902-29-18; e-mail: plesnetsov@gmail.com.

Plesnetsov Yury Alexandrovich – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Senior Researcher, Head of the department of metal forming. National Technical University «Kharkov Polytechnic Institute», tel.: (097) 902-29-18; e-mail: plesnetsov@gmail.com

Христиченко Анастасія Миколаївна – студентка кафедри обробки металів тиском, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», тел.: (097) 026-17-38; e-mail: Anast733@mail.ru.

Христиченко Анастасия Николаевна – студентка кафедры обработки металлов давлением, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», тел.: (097) 026-17-38; e-mail: Anast733@mail.ru.

Khristichenko Anastasia Nikolaevna – student of the department of metal forming, National Technical University «Kharkov Polytechnic Institute», tel.: (097) 026-17-38; e-mail: Anast733@mail.ru

Христиченко Єлизавета Миколаївна – студентка кафедри обробки металів тиском, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», тел.: (050) 969-72-14; e-mail: Lizax.2014@gmail.com.

Христиченко Елизавета Николаевна – студентка кафедры обработки металлов давлением, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», тел.: (050) 969-72-14; e-mail: Lizax.2014@gmail.com.

Khristichenko Elizaveta Nikolaevna – student of the department of metal forming, National Technical University «Kharkov Polytechnic Institute», tel.: (050) 969-72-14; e-mail: Lizax.2014@gmail.com.

УДК 621.7: 621.373

А.И. СЕРДЮК, В.В. КУХАРЬ, А.Г. ПРИСЯЖНЫЙ

АНАЛИЗ БАЗОВЫХ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ С УЧЕТОМ ИХ ОСНОВНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ

Технология трехмерной печати по праву считается самым значительным прорывом XXI века. Технологическая эволюция трехмерного принтера создала новую область знаний – аддитивные технологии. Дискуссия о том, какая технология лучше, не имеет значения, так как у каждой из них есть целевые назначения. В статье выполнен анализ базовых аддитивных технологий с учетом их основных технологических возможностей и области применения. Даны рекомендации о предварительном выборе аддитивных технологий при изготовлении прототипов и готовых изделий.

Ключевые слова: аддитивные технологии; SLA; FDM; SLS.

Технологія тривимірного друку по праву вважається найбільш значним проривом XXI століття. Технологічна еволюція тривимірного принтера створила нову галузь знань – адитивні технології. Дискусія про те, яка технологія краще, не має значення, так як у кожній з них є цільові призначення. У статті виконано аналіз базових адитивних технологій з урахуванням їх основних технологічних можливостей і області застосування. Дано рекомендації про попередньому виборі адитивних технологій при виготовленні прототипів і готових виробів.

Ключові слова: адитивні технології, SLA; FDM; SLS.

The Three-Dimensional printing technology is considered the most significant breakthrough of the XXI century. The technological evolution of three-dimensional printer has created a new area of knowledge – additive manufacturing. Additive manufacturing are no longer used only for prototyping, but is increasingly used for the manufacture of the final product. To select a suitable technology developer needs to know the capabilities of these technologies. The aim of the article is analysis of the basic additive technologies based on their main technological features and fields of application in the manufacture of prototypes and finished products. Pre-selection of additive technologies in the production model or the finished product can be made on the basis of the following recommendations: – for creating accurate models or finished products with the mechanical properties of the metal, it is advisable to apply the technology of SLS; – in the manufacture of similar grades of products with mechanical properties of plastics industrial level it is recommended to apply the technology of SLA, and on a limited budget – FDM.

Keywords: additive manufacturing; SLA; FDM; SLS.

Введение. Технология трехмерной печати по праву считается самым значительным прорывом XXI века. Технологическая эволюция трехмерного принтера создала новую область знаний – аддитивные технологии (АТ). В отличие от традиционных технологий обработки металла аддитивное производство построено не на вычитании, а на добавлении материала. Уникальные возможности технологии позволяют устранить многие традиционные производственные ограничения. При этом на выходе получаются детали сложной геометрической формы, созданные в короткие сроки. Когда скорость изготовления продукции и издержки производства сокращается в десятки раз, это меняет всю экономику машиностроения и смежных отраслей промышленности. То, что в конце прошлого века являлось научной экзотикой, неожиданно стало приносить прибыль.

Например, в авиастроении используется производственный показатель «buy-to-fly» (сколько из купленных материалов полетело). Так, при производстве авиационных двигателей компания Lockheed Martin's, используя аддитивные технологии, смогла уменьшить это соотношение с 33:1 до 1:1 [1].

Анализ последних исследований и публикаций. В настоящее время на рынке АТ представлено более 800 типов промышленных машин (3D принтеров) и более 1300 типов материалов, применяемых в данных технологиях [2]. Наиболее распространенными технологиями, которые используют в 3D принтерах, являются Stereolithography (SLA), Fused Deposition Modeling (FDM) и Selective laser sintering (SLS) [3].

Дискуссия о том, какая машина или технология лучше не имеет значения, так как у каждой из них есть

целевые назначения. АТ больше не используются только для создания прототипов, а все больше применяются для изготовления конечной продукции. Для выбора подходящей технологии разработчик должен основываться на их технологических возможностях.

Цель работы. Анализ базовых АТ с учетом их основных технологических возможностей и области применения при изготовлении прототипов и готовых изделий.

Изложение основного материала. Рассмотрим технологические возможности и области применения перечисленных АТ в порядке их создания по следующим технологическим параметрам:

- максимальные габаритные размеры изготавливаемого изделия за один цикл, мм;
- минимальная толщина стенки изделия, мм;
- толщина слоя, мм;
- точность изготовления изделия, %.

Технология SLA является родоначальницей всех последующих технологий АТ, но остается наиболее используемой и имеет следующие технологические достижимые показатели (табл.1) [2].

Таблица 1 – Технологические показатели технологии SLA

№	Технологический показатель	Значение параметра
1	Максимальные линейные размеры изделия (X×Y×Z), мм	1498 x 762 x 558
2	Минимальная толщина стенки изделия, мм	0,8
3	Толщина слоя, мм	0,1
4	Точность изготовления изделия, %	± 0,2

Основным материалом, применяемым для данной технологии, являются жидкие фотополимеры. Физико-химические свойства полимеров могут различаться в зависимости от того, какие требования предъявляются к готовому изделию. Некоторые по прочностным характеристикам не уступают ABS пластику (например, материал ABS-Like Class фирмы 3D SYSTEM [4]), некоторые при полном застывании остаются эластичными, как резина (например, материал серии Tango и Agilus фирмы Stratasys [5]).

Данная технология имеет следующие области применения:

- создание конструкторских и дизайнерских прототипов;
- создание формообразующей оснастки для различных видов точного литья (вакуумное литье, литье в оболочковые формы);
- создание биосовместимых имплантов;
- восстановление объектов по данным компьютерных томографов (для целей медицины, криминалистики и археологии);
- малообъемное производство сложных геометрий.

Технология FDM на сегодняшний день является наиболее доступной АТ. В табл. 2 представлены основные технологические характеристики FDM технологии [2].

Таблица 2 – Технологические показатели технологии FDM

№	Технологический показатель	Значение параметра
1	Максимальные линейные размеры изделия (X×Y×Z), мм	6096 x 2362 x 1828
2	Минимальная толщина стенки изделия, мм	1,0
3	Толщина слоя, мм	0,18
4	Точность изготовления изделия, %	± 0,15

Стоимость материалов для печати является самой низкой из всех доступных технологий. FDM позволяет использование термопластичных пластмасс промышленного уровня, которые могут выдерживать высокую температуру, воздействие вредных химических веществ, стерилизацию и интенсивные механические нагрузки [6]. Основные области применения FDM технологии аналогичны технологии SLA.

Технология SLS сочетает в себе гибкость АТ с механическими свойствами металла. В табл.3 представлены основные технологические показатели SLS технологии [2].

Таблица 3 – Технологические показатели технологии SLS

№	Технологический показатель	Значение параметра
1	Максимальные линейные размеры изделия (X×Y×Z), мм	1390 x 700 x 500
2	Минимальная толщина стенки изделия, мм	0,5
3	Толщина слоя, мм	0,03
4	Точность изготовления изделия, %	± 0,2

В отличие от методов SLA и FDM она не требует построения опорных структур. Это позволяет достичь практически неограниченной геометрической сложности изготавливаемых изделий. В сравнении с другими методами АТ, SLS отличается высокой универсальностью в выборе расходных материалов. К ним относят различные полимеры (например, нейлон или полистирол), металлы и сплавы (сталь, титан, драгоценные металлы, кобальт-хромовые сплавы и др.), а также композиты и песчаные смеси.

Технология SLS имеет следующие области применения:

- создание функциональных деталей и готовых изделий;
- печать запасных частей к оборудованию и машинам;
- изготовление производственных инструментов;
- изготовление пресс-форм.

Выводы.

1. Аддитивные технологии является одними из самых перспективных технологий производства прототипов и готовых изделий. Их применение позволяет существенно повысить эффективность работы и сократить сроки производства готовых изделий.

2. Предварительный выбор АТ при производстве модели или готового изделия может быть выполнен на основании следующих рекомендаций:

3. - при создании высокоточных моделей или готовых изделий с механическими свойствами металла целесообразно применять технологию SLS;

4. - при изготовлении аналогичного сортамента изделий с механическими свойствами пластмасс промышленного уровня рекомендуется применять технологию SLA, а при ограниченном бюджете – FDM.

Список литературы

1. Dehoff, R. Case Study: Additive Manufacturing of Aerospace Brackets / R. Dehoff, C. Tallman, C. E. Duty, P. E. William, Y. Yukinori, C. Wei, C. F. Blue // *Advanced Materials and Processes*. – 2013. – Vol. 171 Issue 3. – P. 19-22.
2. Senvol Database : Industrial Additive Manufacturing Machines and Materials [Электронный ресурс] / Senvol LLC. – Режим доступа : <http://senvol.com/database/>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. англ.
3. Kianian B. Wohlers Report 2017 : 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry, Annual Worldwide Progress Report : Chapters titles : The Middle East, and other countries / B. Kianian. – Fort Collins : Wohlers Associates, 2017. – 344 p.
4. 3D Systems : 3D Stereolithography Printers [Электронный ресурс] / 3D Systems, Inc. – Режим доступа : https://www.3dsystems.com/sites/default/files/2017-05/3D-Systems_SLA_Specsheet_A4_US_2017.05.16_WEB.pdf, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. англ.
5. Stratasys: 3D print flexible, soft-touch models [Электронный ресурс] / Stratasys Ltd. – Режим доступа : <http://www.stratasys.com/materials/polyjet/rubber-like>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. англ.
6. Stratasys : 3D print durable parts in production-grade materials [Электронный ресурс] / Stratasys Ltd. – Режим доступа : <http://www.stratasys.com/materials/fdm>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. англ.

Bibliography (transliterated)

1. Dehoff, R., Duty, Ch., Peter, W., Yamamoto, Yu., Chen, W., Blue, C. «et al.». (2013). Additive manufacturing of aerospace brackets. *Advanced Materials & Processes*, March 2013, 19–22.
2. Senvol Database: Industrial Additive Manufacturing Machines and Materials. (n.d.). senvol.com. Retrieved from <http://senvol.com/database/>.
3. Kianian, B. (2017). Wohlers Report 2017: 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry, Annual Worldwide Progress Report: Chapters titles: The Middle East, and other countries. (22 ed.). FORT COLLINS, COLORADO, USA: Wohlers Associates
4. 3D Systems: 3D Stereolithography Printers. (n.d.). www.3dsystems.com. Retrieved from https://www.3dsystems.com/sites/default/files/2017-05/3D-Systems_SLA_Specsheet_A4_US_2017.05.16_WEB.pdf.
5. Stratasys: 3D print flexible, soft-touch models. (n.d.). www.stratasys.com. Retrieved from <http://www.stratasys.com/materials/polyjet/rubber-like>.
6. Stratasys: 3D print durable parts in production-grade materials. (n.d.). www.stratasys.com. Retrieved from <http://www.stratasys.com/materials/fdm>

Поступила (received) 15.11.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Аналіз базових адитивних технологій з урахуванням їх технологічних можливостей / О. І. Сердюк, В. В. Кухар, А. Г. Присяжний // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – №35(1257). – С. 60–62 – Библиогр.: 6 назв. – ISSN 2519-2671

Анализ базовых аддитивных технологий с учетом их основных технологических возможностей / А. И. Сердюк, В. В. Кухарь, А. Г. Присяжний // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – №35(1257). – С. 60–62 – Библиогр.: 6 назв. – ISSN 2519-2671

Analysis of basic additive manufacturing based on their primary technological capabilities / Serdiuk, A., Kukhar, V., Prisyazhnyi, A. // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Innovative technologies and equipment of materials processing in engineering and metallurgy. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2017. – No 35(1257). – P. 60–62. – Bibl.:6. – ISSN 2519-2671

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Сердюк Олексій Іванович – кандидат технічних наук, доцент, ДВУЗ «Приазовський державний технічний університет», доцент кафедри обробки металів тиском; м. Маріуполь, Україна; e-mail: tc.mariupol@gmail.com.

Сердюк Алексей Иванович – кандидат технических наук, доцент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», доцент кафедры обработки металлов давлением; г. Мариуполь, Украина; e-mail: tc.mariupol@gmail.com.

Serdiuk Oleksii Ivanovich – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, SHEI «Priazovskyi State Technical University», Associate Professor at the Department of Metal Forming, Mariupol, Ukraine; e-mail: tc.mariupol@gmail.com.

Кухар Володимир Валентинович – доктор технічних наук, професор, ДВУЗ «Приазовський державний технічний університет», професор кафедри обробки металів тиском; м. Маріуполь, Україна; e-mail: kvv.mariupol@gmail.com

Кухарь Владимир Валентинович – доктор технических наук, профессор, Государственное высшее учебное заведение «Приазовский Государственный Технический Университет», профессор кафедры обработки металлов давлением; г. Мариуполь, Украина; e-mail: kvv.mariupol@gmail.com

Kukhar Volodymyr Valentynovych – Doctor of Technical Sciences, Professor, SHEI «Priazovskyi State Technical University», Professor at the Department of Metal Forming, Mariupol, Ukraine; e-mail: kvv.mariupol@gmail.com

Присяжний Андрій Григорович – кандидат технічних наук, доцент, ДВУЗ «Приазовський державний технічний університет», доцент кафедри обробки металів тиском; м. Маріуполь, Україна; e-mail: agp87514@gmail.com

Присяжний Андрей Григорьевич – кандидат технических наук, доцент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», доцент кафедры обработки металлов давлением, г. Мариуполь, Украина; e-mail: agp87514@gmail.com

Prisyazhnyi Andrii Hryhorovych – Candidate of Technical Sciences (Ph. D), SHEI «Priazovskyi State Technical University», Associate Professor at the Department of Metal Forming, Mariupol, Ukraine; e-mail: agp87514@gmail.com

УДК 628.16:621.981.3

О.І. ТРИШЕВСЬКИЙ, М.В. САЛТАВЕЦЬ**МЕТОДИКА СПРОЩЕНОГО ОБЧИСЛЕННЯ ТЕПЛОВОГО СТАНУ МЕТАЛУ
ПРИ ПРОКАТЦІ ТОНКОГО ЛИСТА**

Для сучасних двошарових валків з заевтектної сталі, в системі координат, в якій ось горизонтального валка поєднана з віссю y , розроблена методика спрощеного обчислювання теплового стану металу при прокатці тонкого листа, згідно з якою для отримання результатів у числовому вигляді в створених математичних моделях теплообміну полоси під час прокатки переходять від диференціальних рівнянь з частковими похідними до відповідних рівнянь в кінцевих від'ємностях. Рівняння в кінцевих від'ємностях отримують шляхом заміни похідних їх від'ємностями. Загальний тепловий стан металу може бути побудований на основі отриманих залежностей для одновимірних задач.

Ключові слова: тонкий лист, гаряча прокатка, прискорене охолодження, робочі валки, тепловий стан, математичне моделювання, теплообмінні процеси, метод кінцевих від'ємностей.

Для современных двуслойных валков из заэвтектной стали, в системе координат, в которой ось горизонтального валка совпадает с осью y , разработана методика упрощённого вычисления теплового состояния металла при прокатке тонкого листа, в соответствии с которой для получения результатов в численном виде в созданных математических моделях теплообмена полосы при прокатке, переходят от дифференциальных уравнений в частных производных к соответствующим уравнениям в конечных разностях. Уравнения в конечных разностях получают путём замены производных их разностями. Общее тепловое состояние металла может быть построено на основе полученных зависимостей для одномерных задач.

Ключевые слова: тонкий лист, горячая прокатка, ускоренное охлаждение, рабочие валки, тепловое состояние, математическое моделирование, теплообменные процессы, метод конечных разностей.

Use of the system of the speed-up cooling of stripe between draft and clean the groups of cages of flatting mill, and also the speed-up cooling of stripe after a clean group is used with the purpose of receipt of hot-rolled strip in to 0,7 mm thick One of perspective ways of decision of tasks of improvement of new technological processes and equipment at the calculation of temperature-speed parameters at planning of the modes of wringing out and calculation of efforts of rolling is a method of mathematical design with the use of the analog and digital computing engineering.

For modern rollers from hypereutectoid steel, in the system of coordinates, in that the axis of horizontal roller coincides in by an axis at, methodology of the simplified calculation of the thermal state of metal is worked out at rolling of thin sheet, in accordance with that for the receipt of results in a numeral kind in the created mathematical models of heat exchange of stripe at rolling, go across from differential equalizations in partials to corresponding equations differences. Equations differences get substitutionally by their differences derivatives. The common thermal state of metal can be built on the basis of the got dependences for unidimensional tasks.

Keywords: thin sheet, hot rolling, speed-up cooling, working felling, thermal state, mathematical design, heat-exchange processes, method of eventual differences.

Вступ. На межі XX та XXI століть у

листопрокатному виробництві з'явився новий технологічний процес, сутність якого полягає у використанні системи прискореного охолодження полоси між чорною та чистою групами клітей листопрокатного стану, а також прискорене охолодження полоси за чистою групою з метою отримання гарячекатаної полоси товщиною до 0,7 мм. Перспективним є використання існуючого на Україні прокатного устаткування під нову технологію. Але до цього часу невирішеною залишається проблема охолодження полоси і валків при мінімумі розходу енергії, що дозволило би більш ефективно використовувати існуюче обладнання для здійснення нового технологічного процесу. Внаслідок цього, розробка раціонального охолодження полоси і валків на основі математичного моделювання цього технологічного процесу є своєчасною та актуальною.

Аналіз стану питання, основних досягнень і літератури. Існуючі режими охолодження валків і полоси були розроблені на основі експериментальних досліджень експлуатації діючого прокатного устаткування у нашій країні і за кордоном. Спроба експериментальним шляхом відпрацювати елементи нового технологічного процесу на існуючих прокатних станах привела до значних збитків через поломки устаткування. Це сталося через відсутність

достовірної методики обліку температурно-швидкісних параметрів при проектуванні режимів обтіснення і обчисленні зусиль прокатки.

Одним із перспективних шляхів рішення практичних задач розробки нових технологій і устаткування є напрямок, започаткований в НТУ ХПІ Дзяченко С.К. – метод математичного моделювання з використанням аналогової і цифрової обчислюваної техніки.

З використанням цього методу у роботах [1, 2, 3, 4] були створені математичні моделі теплообміну полоси під час прокатки з урахуванням рухомих джерел та стоків тепла, які входять в граничні умови. В цих роботах полосу розглядали як напівобмежене тіло. Це не вносило ніяких погіршень у визначення теплового стану поверхневих шарів валка.

Беручи до уваги різноманітність типів прокатних станів, розташування полоси у клітях (горизонтальне або вертикальне), необхідність кантувань, тобто поворотів полоси у процесі прокатки, практично неможливо ув'язати вісі координат полоси і валка. Тому при проектуванні конкретних систем на ці особливості необхідно звернути особливу увагу. У цих дослідженнях прийнято поєднувати вісь валка і вісь y (горизонтальний валок).

Відомо [8], що стійкість валка значною мірою залежить від твердості його поверхні. Чим вища твердість поверхні валка, тим вища його стійкість. Твердість може бути забезпечена використанням заєвтектоїдної сталі з вмістом вуглецю 1,6 – 1,8%. При навантаженнях, які мають місце на листових станах, використання суцільного валка з заєвтектоїдної сталі проблематичне, бо є ризик його поломки. Розгляд двошарового валка зв'язаний з необхідністю описання теплового стану сучасного інструменту. Тому при теоретичних дослідженнях розглядається схема сучасного двошарового валка.

Згадані моделі описують усі основні варіанти технології листової прокатки при використанні двошарових та суцільних валків. В розроблених моделях враховано теплообмін валка з гарячою половою, а також з водою, що йде на охолодження валка, геометричні розміри зон деформації і примусового охолодження, а також їх взаємне розташування.

В розроблених моделях враховано теплообмін валка з гарячою половою, а також з водою, що йде на охолодження валка, геометричні розміри зон деформації і примусового охолодження, а також їх взаємне розташування. Розроблені моделі є основою для виконання теоретичних досліджень і визначення параметрів нової технології гарячої прокатки полоси на усіх ділянках технологічного процесу.

Дали для отримання результатів у числовому вигляді звичайно переходять від диференціальних рівнянь з частковими похідними до відповідних рівнянь в кінцевих від'ємностях. Рівняння в кінцевих від'ємностях отримують шляхом заміни похідних їх від'ємностями.

У роботах [5, 6, 7] наведені приклади переходу від диференціальних рівнянь з частковими похідними до рівнянь в кінцевих від'ємностях. Вони мають практично однаковий вигляд і відрізняються лише записом в залежності від системи координат (прямокутна чи циліндрична) і виду (лінійного або нелінійного). Наведено, навіть кінцево-від'ємні рівняння призначені для визначення залежностей при обчисленні RC-сіткових, або R-R-сіткових електромоделей при рішенні задач нестационарної теплопровідності неявним кінцево-від'ємним методом [5, 6].

При використанні цифрових обчислювальних машин для визначення розподілу температури у двовірному або тривірному тілі може бути використаний метод обернення матриці. Спроба скористатися текстами програм обернення матриці

(MATINV та EXCH) показала, що їх тексти представлено у спотвореному вигляді, внаслідок чого використання цих програм неможливе. Таким чином, окрім системи рівнянь балансу енергії для усіх вузлів необхідно також самостійно розробити програми обернення матриць великих розмірів. Шлях можливий, але він потребує значних витрат часу.

У разі використання явного кінцево-від'ємного методу задача спрощується – необхідно лише самостійно скласти кінцево-від'ємні рівняння балансу енергії для кожного вузла з урахуванням геометрії об'єктів досліджень.

Матеріали досліджень. Для визначення теплового стану металу використовуємо методику спрощеного обчислення, яка полягає у тому, що по результатам обчисленого температурного поля, на основі окремих залежностей для двовірної задачі, будуємо загальний тепловий стан усього об'єкту досліджень. Тобто, ми зводимо рішення тривірної задачі визначення $T(x, y, z, \tau)$ до вирішення двовірної задачі $T(x, z, \tau)$ для пластини, у якій один лінійний розмір сітки (ширина) більший двох других.

Таким чином, маємо заданий початковий розподіл $T_0 = \text{const}$, та змінні у часі граничні умови III роду на гранях металу, що відображають зміну зон теплообміну при переміщенні їх по поверхні металу. У цьому випадку температурне поле $T(x, y, z, \tau)$ апроксимується отриманими у дискретні моменти часу двовірними полями $T(x, z, \tau)$, які зміщені одне відносно другого на час Δt . Кожне з них має свої граничні умови і відрізняється тільки положенням у часі, тобто має свій початок обліку, зміщений на ціле число кроків по часу.

Для отримання рішення $T(x, z, \tau)$ необхідно послідовно вирішити задачі в i -тій зоні теплообміну у відповідності до заданого порядку проходження зон теплообміну. Кінцевий розподіл температур в i -тій зоні є початковим розподілом для обчислення температур у зоні $i+1$.

Оскільки теплові впливи відрізняються тільки положенням у часі, маємо змогу отримати розподіл $T(x, y, z, \tau)$ для будь-якого значення τ на основі результатів рішення у першому перерізі.

При обчисленні теплового стану металу необхідно враховувати зміни:

- товщини металу під час проходження зони деформування;
- розмірів зони деформування;
- швидкості переміщення шарів металу;
- інтенсивності тепловиділення в об'ємі металу при деформуванні металу.

$$c_m \rho_m \frac{\partial T_m}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_m \frac{\partial T_m}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_m \frac{\partial T_m}{\partial z} \right) + \rho_m u_m \frac{\partial}{\partial x} (c_m T_m) + q_v \quad (1)$$

Рівняння (1) описує тепловий стан нерухомого металу. У роботах [1, 2] описано два можливі підходи до визначення теплового стану металу і валків. При першому – метал і валки рухомі і переміщуються відносно нерухомих джерел впливу. При другому –

(прийнятому в даній роботі) метал і валки – нерухомі, а джерела впливу переміщуються по їх поверхнях.

Схему поділу слябу сіткою у подовжньому перерізі представлено на рис. 1

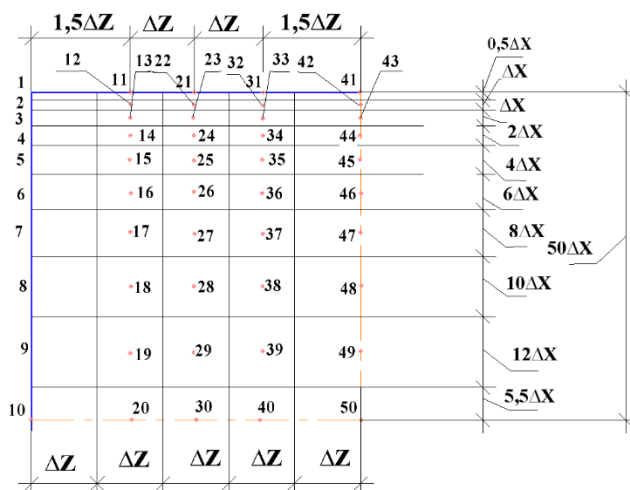


Рис. 1 – Поділ слябу сіткою у подовжньому напрямку (вісесиметрична задача)

Як і в роботі [8] (поділ слябу сіткою у поперечному перерізі), у напрямку вісі x сітка гущіша у підповерхневих шарах і більш рідка ближче до середини слябу.

По вісі z сітка поділена на кроки Δz . Приймаємо, що $\Delta z = l_d$ – довжині дуги захвату в зоні деформування металу. Прийняття $\Delta z = l_d$ обумовлено тим, що у зоні деформування металу чекаємо найбільш інтенсивний стік тепла з коефіцієнтами теплопередачі на 1–2 порядки вищими, ніж на інших ділянках технологічного процесу. Якщо виникне необхідність округлення до цілого

:

значення кількості кроків Δz , на будь-якій ділянці технологічного процесу, це не внесе суттєвої похибки, при обчисленні теплового стану металу, внаслідок невеликих значень коефіцієнтів тепловіддачі на цих ділянках.

Методика отримання алгебраїчних рівнянь для визначення температури у вузлах сітки аналогічна до вищенаведеної. Так, для внутрішнього вузла 24 (рис. 1) зміняться лише коефіцієнти, у зв'язку з тим, що ширина вузла тепер дорівнює Δz , а не $2\Delta z$.

Рівняння для вузла 24 (1) матиме вид

$$T_{24,\tau+\Delta\tau} = 0,1666F_0 (2T_{23,\tau} + T_{25,\tau}) + (1 - 0,5F_0)T_{24,\tau} + \frac{F_0}{B^2} (T_{34,\tau} + T_{14,\tau} - 2T_{24,\tau}) + \frac{q_v\Delta\tau}{c\rho} + \frac{U\Delta\tau}{3\Delta x} (2T_{23,\tau} + T_{25,\tau} - 3T_{24,\tau}), \quad (2)$$

де B – безрозмірний коефіцієнт ($B = \Delta z / \Delta x$).

При $\Delta z = 75$ мм і $\Delta x = 1,5$ мм рівняння (2) матиме вид

$$T_{24,\tau+\Delta\tau} = 0,1666F_0 (2T_{23,\tau} + T_{25,\tau}) + (1 - 0,5F_0)T_{24,\tau} + 0,0004F_0 (T_{34,\tau} + T_{14,\tau} - 2T_{24,\tau}) + \frac{q_v\Delta\tau}{c\rho} + \frac{U\Delta\tau}{3\Delta x} (2T_{23,\tau} + T_{25,\tau} - 3T_{24,\tau}) \quad (3)$$

Рівняння (3) практично повторює рівняння (12) роботи [8] за винятком коефіцієнту (0,0004) при F_0 у третьому члені. Внаслідок цього, третім складовим

можна знехтувати, бо він практично є досить малим і ми знов, як і у роботі [9] (формула 13) приходимо до виду рівняння:

$$T_{24,\tau+\Delta\tau} = 0,1666F_0(2T_{23,\tau} + T_{25,\tau}) + (1 - 0,5F_0)T_{24,\tau} + \frac{q_v\Delta\tau}{c\rho} + \frac{U\Delta\tau}{3\Delta x}(2T_{23,\tau} + T_{25,\tau} - 3T_{24,\tau}) \quad (4)$$

тобто, до рішення одновимірної задачі.

Висновок.

Таким чином, розроблена методика спрощеного обчислювання теплового стану металу при прокатці тонкого листа, згідно з якою для отримання результатів у числовому вигляді в створених математичних моделях теплообміну полоси під час прокатки переходять від диференціальних рівнянь з частковими похідними до відповідних рівнянь в кінцевих від'ємностях. Рівняння в кінцевих від'ємностях отримують шляхом заміни похідних їх від'ємностями. Використання спрощеної методики для визначення теплового стану металу полоси при прокатці тонкого листа цілком виправдано. Загальний тепловий стан металу може бути побудований на основі отриманих залежностей для одновимірних задач.

Список літератури

1. Trishevskii O.I., Saltavets N.V. Mathematical model of the thermal state of strip in rolling // Steel in translation, 2009 – №2, Vol. 39 – P.42–44. Allerton Press Inc.
2. Тришевський О.І., Салтавець М.В. Дослідження теплового стану штаби при прокатці // Вісник ХНТУСГ «Ресурсозберігаючі технології, матеріали та обладнання у ремонтному виробництві». – вип.122, Харків, 2012. – С. 138–146.
3. Тришевський О.І., Салтавець Н.В. Теоретические исследования теплового состояния рабочих валков при горячей прокатке листа. // Сталь, 2012. – №9. – С. 81–84.
4. Тришевський О. І., Салтавець М. В. Математичне моделювання елементів нових технологічних процесів прокатки. // Вестник национального технического университета «ХПИ», № 43, 2014/ – С. 175–183.
5. Коздоба Л.А. Электрическое моделирование явлений тепло- и массопереноса. // М.: Энергия, 1972. – 296 с.

6. Кузьмин М.П. Электрическое моделирование нестационарных процессов теплообмена. // М.: Энергия, 1974. – 416 с.
7. Крейт Ф., Блэк У. Основы теплопередачи. Пер. с англ. // М.: Мир, 1983. – 512 с.
8. Воронцов Н.М., Жадан В.Т., Шнееров Б.Я. Эксплуатация валков обжимных и сортовых станов. // М.: Металлургия, 1973. – 228 с.
9. Тришевский О.И., Салтавец Н.В. Использование метода явных конечных разностей для решения задач теплообмена при горячей прокатке. // Сталь, 2017. – №3. – С. 33–36.

Bibliography (transliterated)

1. Trishevskii O.I., Saltavets N.V. Mathematical model of the thermal state of strip in rolling // Steel in translation, 2009 – №2, Vol. 39 – P.42–44. Allerton Press Inc.
2. Trishevskiy O.I., Saltavets M.V. Doslidzhennya teplovogo stanu shtabi pri prokatki // Visnik KhNTUSG "Resursozberigayuchi tekhnologii. materialy ta obladnannya u remontnomu virobnitstvi", Vol 122. – Kharkiv, 2012. – P. 138–146.
3. Trishevskiy O.I., Saltavets N.V. Teoreticheskiye issledovaniya teplovogo sostoyaniya rabochikh valkov pri goryachey prokatke lista. // Stal. 2012. – №9. – P. 81–84.
4. Trishevskiy O. I., Saltavets M. V. Matematichne modelyuvannya elementiv novikh tekhnologichnikh protsesiv prokatki. // Vestnik natsionalnogo tekhnicheskogo universiteta "KhPI", No 43. 2014. – P. 175–183.
5. Kozdoba L.A. Elektricheskoye modelirovaniye yavleniy teplo- i massoperenosa. // M.: Energiya. 1972. – 296 p.
6. Kuzmin M.P. Elektricheskoye modelirovaniye nestatsionarnykh protsessov teploobmena. // M.: Energiya. 1974. 416 p.
7. Kreyt F., Blek U. Osnovy teploperedachi. Per. s angl. // M.: Mir. 1983. – 512 p.
8. Vorontsov N.M., Zhadan V.T., Shneerov B.Ya. Eksploatatsiya valkov obzhimnykh i sortovykh stanov. // M.: Metallurgiya, 1973. – 228 p/
9. Trishevskiy O.I., Saltavets N.V. Ispolzovaniye metoda yavnykh konechnykh raznostey dlya resheniya zadach teploobmena pri goryachey prokatke. // Stal. 2017. – №3. – P. 33–36.

Надійшла (received) 22.09.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Методика спрощеного обчислення теплового стану металу при прокатці тонкого листа // О.І. Тришевський, М.В. Салтавець // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – №35(1257). – С. 63–67 – Библиогр.: 9 назв. – ISSN 2519-2671

Методика упрощенного вычисления теплового состояния металла при прокатке тонкого листа / О.И. Тришевский, Н.В. Салтавец // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – №35(1257). – С. 63–67 – Библиогр.: 9 назв. – ISSN 2519-2671

Method for the simplified calculation of the thermal state of a metal during the rolling of a thin sheet / O.I. Trishevskiy, N.V. Saltavec // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Innovative technologies and equipment of materials processing in engineering and metallurgy. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2017. – No 35(1257). – P. 63–67. – Bibl.:9. – ISSN 2519-2671

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Author

Тришевський Олег Ігорович, доктор технічних наук, професор, Харківський національний технічний університет сільського господарства ім.Петра Василенка, завідувач кафедри «Технологія матеріалів», тел. 050-407-26-11, E-mail: 3shev@ukr.net

Тришевский Олег Игоревич, доктор технических наук, профессор, Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства им.Петра Василенко, заведующий кафедры «Технология материалов», тел. 050-407-26-11, E-mail: 3shev@ukr.net

Trishevskiy Oleh Igorovich, doctor of engineering sciences, professor, Kharkiv national technical university of agriculture, the name of Petro Vasilenko, manager of department «Technology of materials», tel., 407-26-11, E-mail: 3shev@ukr.net

Салтавець Микола Вільямович, Харківський національний технічний університет сільського господарства ім.Петра Василенка, інженер, тел. 7-164-153.

Салтавец Николай Вильямович, Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства им.Петра Василенко, инженер, тел. 7-164-153.

Saltavec' Nikolay Vil'yamovich, Kharkiv national technical university of agriculture the name of Petro Vasilenko, engineer, tel. 164-153.

УДК 621.98.044.4

Є.А. ФРОЛОВ, М.М. МОРОЗ, Ю.С. САЛЕНКО, С.Г. ЯСЬКО

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЗУСИЛЛЯ ПРИТИСКАННЯ ЗАГОТОВКИ НА ЯКІСТЬ ПРОЦЕСУ ВИТЯГУВАННЯ ВИСОКОШВИДКІСНИМ ШТАМПУВАННЯМ

Виконано експериментальне дослідження з визначення впливу зусилля притискання на якість процесу пневмоударного витягування деталей з тонкостінного матеріалу. Наведено показники якості деталей із зазначенням зовнішніх ознак браку. Розроблена діаграма для визначення зусилля притискання залежно від товщини і діаметра деталі, що штампується. Наведено класифікацію основних факторів, що впливають на якість деталей в процесі витягування з урахуванням місця виникнення, характеру дії і ступеня впливу зусилля притискання. Зроблено висновок, що суттєвого впливу на процес пневмоударного витягування завдає, поряд зі швидкістю формоутворення, також і зусилля притискання заготовки.

Ключові слова: штампування, витяжка, пневмоударна, якість, притиск, зусилля.

Выполнено экспериментальное исследование по определению влияния усилия прижима на качество процесса пневмоударной вытяжки деталей из тонкостенного материала. Приведены показатели качества деталей с указанием внешних признаков брака. Разработана диаграмма для определения усилия прижима в зависимости от толщины и диаметра штампуемой детали. Приведена классификация основных факторов влияющих на качество деталей в процессе вытяжки с учетом места возникновения, характера действия и степени влияния усилия прижима. Сделан вывод, что существенное влияние на процесс пневмоударного вытягивания оказывает, наряду со скоростью формообразования, также и усилие прижима заготовки.

Ключевые слова: штамповка, вытяжка, пневмоударная, качество, прижим, усилие.

An experimental study was performed to determine the influence of the clamping force on the quality of the process of air-blown drawing of parts from thin-walled material. The indexes of the quality of parts with the indication of external signs of marriage are given. It is established that the stresses in the initial stage of pulling with a clamp are of greatest importance at a high degree of deformation. When stretching with a reduced degree of deformation, the initial stresses reach insignificant values, and when stretching without pressing it is practically equal to zero. The actual value of the stress in the dangerous section, and consequently the amount of the pressing force, depends on the resistance of the deformation metal, the degree of deformation, the relative thickness of the sheet, the radius of the matrix rounding and the lubricant. A diagram is developed for determining the clamping force, depending on the thickness and diameter of the part being punched. The classification of the main factors affecting the quality of parts during the drawing is given, taking into account the place of origin, the nature of the action and the degree of influence of the clamping force. It is concluded that, in addition to the speed of shaping, the pressing force of the workpiece exerts a significant influence on the process of the pneumatic impact

Keywords: stamping, pneumatic-mechanical, forming, quality, clamping, force.

Вступ. Пневмоударне штампування рухомим середовищем (рідина або поліуретан) дозволяє отримувати складні за формою і точні за розмірами тонколистові вироби із значною економією витрат на штампове оснащення [1].

У сучасних умовах до якості поверхонь штампованих деталей висуваються високі вимоги, тому суттєвого значення набуває вдосконалення процесу пневмоударного витягування. Стійкість пластичного формоутворення листового матеріалу – одна з основних вимог отримання штампованих деталей високої якості. Втрата стійкості при високошвидкісному формоутворенні призводить до підвищення рівня бракованих виробів внаслідок руйнування, утворення складок і гофрів, коротких надривів і тріщин в матеріалі виробу.

Встановлення завдання дослідження. Відомо, що в процесах глибокого витягування на якість деталей, що штамнуються значною мірою впливає зусилля притискання заготовки [2], особливо актуально це при високошвидкісних методах штампування [3-6].

Метою роботи є вивчення впливу зусилля притискання на якість процесу пневмоударного витягування деталей з тонколистового матеріалу.

Основний матеріал. Для отримання якісного витягування істотне значення має ретельне встановлення притискного кільця (складкоутримувача) і визначення необхідного тиску. Притискання заготовки застосовується для того, щоб запобігти утворенню складок на стінках деталі або фланця. Величина тиску притискання має бути оптимальною, так як підвищення

тиску збільшує зусилля витягування та призводить до значного потоншення матеріалу, відриву дна або фланця деталі, а зниження тиску викликає утворення складок і гофрів.

Нами експериментально встановлено, що для першої операції витягування з плоскої заготовки в разі пневмоударного штампування притискання необхідне, коли

$$D_3 - d_1 \geq 20S, \quad (1)$$

де D_3 – діаметр плоскої заготовки, мм;
 d_1 – діаметр першого витягування, мм; S – товщина матеріалу, мм.

Для другої і наступних операцій необхідність притискання залежить від відносної товщини матеріалу ε і визначається за формулою:

$$\varepsilon = \frac{S}{d_{n-1}} \cdot 100\% \quad (2)$$

де d_{n-1} – діаметр другої і наступних операцій, мм.

Витяжка здійснюється з притисканням, якщо $\varepsilon \leq 1,2$, без притискання якщо $\varepsilon > 1,4$.

На рисунку 1 показана форма робочих частин матриці при витягуванні без притискання. Матрицю з кінцевою робочою частиною (з кутом утворюючим 30°)

рекомендується застосовувати (рисунок 1, а) при порівняно невеликих переходах першого витягування, коли коефіцієнт витягування $m \geq 0,6$. Від складкоутримувача можна відмовитися при малій висоті деталей, що витягуються.

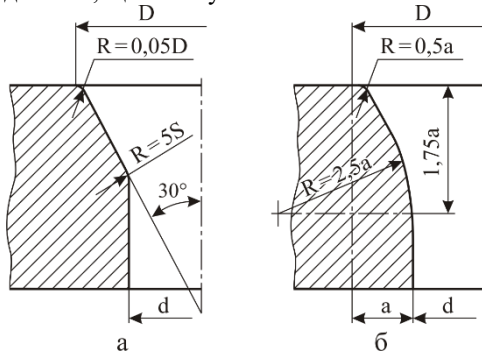


Рис. 1 – Форма робочих частин матриць для витягування без притискання

Досяжна без складкоутримувача висота деталі, що витягується h залежить від товщини матеріалу S і

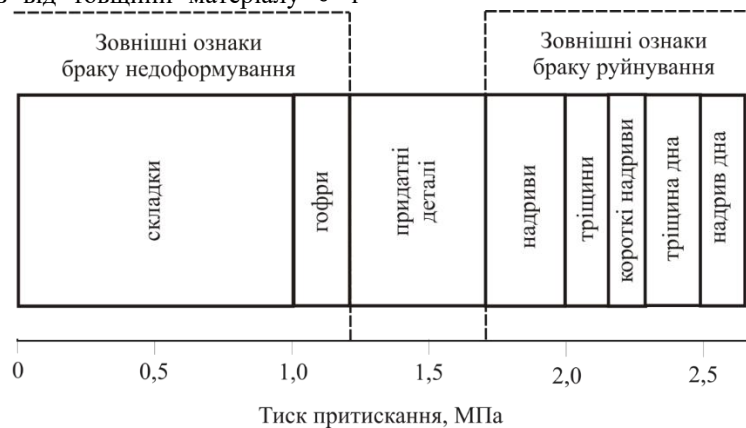


Рис. 2 – Вплив тиску притискання на якість деталей

Розрахунковий тиск притискання при першому витягуванні циліндричних деталей з плоскої заготовки при пневмоударному штампуванні рідиною знаходився за формулою:

$$P_n = C \cdot \left[(\beta - 1)^3 + 0,5 \frac{d}{100 \cdot S} \right] \cdot \sigma_s, \quad (4)$$

де β – співвідношення діаметрів D_s/d перед початком формозміни;

C – коефіцієнт, визначений експериментально, який в даному випадку може бути прийнятий рівним 0,25.

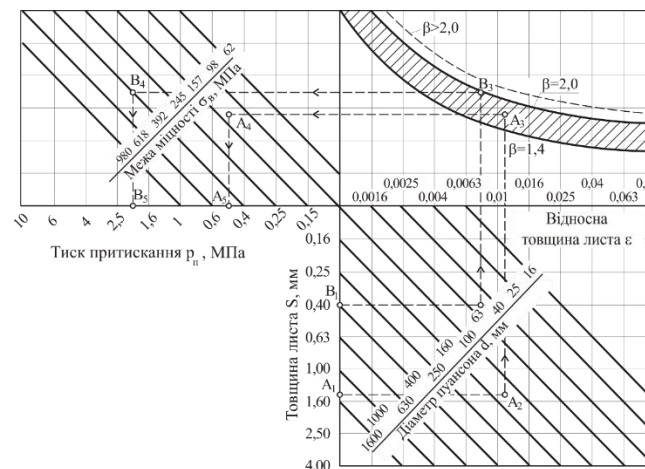


Рис. 3 – Визначення тиску притискання круглих витяжок

На діаграмі (рис. 2) наведено показники якості із зазначенням зовнішніх ознак браку. Встановлено, що напруження в початковій стадії витягування з притискуванням мають найбільше значення при високому ступені деформації ($m = 0,5 \dots 0,4$).

При витягуванні зі зниженим ступенем деформації $m > 0,6$ початкові напруження досягають незначних величин, а при витягуванні без притискування практично дорівнюють нулю.

Фактична величина напружень в небезпечному перерізі, а отже і величина зусилля притискування залежить від опору металу деформації σ_ϵ , ступеня деформації $\beta = D_3/d$, відносної товщини листа $\epsilon = S/d$, радіуса заокруглення матриці r_m і змащення. Беручи найбільше допустиме напруження

в небезпечному перерізі $\sigma_g = 1,1 \cdot \sigma_\epsilon$, використовуючи результати експериментів і виробничі дані розроблена діаграма для визначення тиску притискування (рис.3).

На рисунку 4 показані деталі отримані в процесі експериментів по дослідженню тиску притискування заготовки при витягуванні пневмоударним штампуванням.

У таблиці 1 наведено класифікацію основних факторів, що впливають на якість деталей в процесі витягування із застосуванням методу пневмоударного штампування, з урахуванням місця виникнення, характеру дії і ступеня впливу при виконанні технологічних операцій.



Рис. 4 – Деталі, отримані при різних рівнях зусилля притискування заготовки:
 а – 1,96 МПа; б – 0,98 МПа; в – 2,45 МПа; г – 1,47 МПа

Таблиця 1 – Класифікація факторів, що впливають на параметри точності деталей при формоутворенні методом пневмоударного штампування.

№ п/п	Найменування	Вид		Характер дії	Ступінь впливу
		Конструктивний	Технологічний		
1	Товщина матеріалу, що штампується		+	систематичний	домінуюча
2	Механічні властивості матеріалу, що штампується		+	систематичний	домінуюча
3	Швидкість деформування, зусилля і робота по деформації	+		випадковий	істотна
4	Конструкція витяжної матриці (радіус матриці, форма робочого контуру)	+		систематичний	домінуюча
5	Діаметр заготовки		+	систематичний	домінуюча
6	Зусилля притискування заготовки		+	випадковий	істотна
7	Маса бойка	+		систематичний	домінуюча
8	Діаметр робочого контуру матриці		+	систематичний	домінуюча
9	Точність установки заготовки	+		випадковий	мала

Висновок: Встановлено, що суттєвого впливу на процес пневмоударного витягування завдає, поряд зі швидкістю формоутворення, також і зусилля притискування заготовки.

Список літератури

1. Романовский В. П. Справочник по холодной штамповке. 6-е изд., перераб. и доп. / В. П. Романовский – Л.: Машиностроение. 1979. – 520 с.
2. Исаченков Е. И. Штамповка резиной и жидкостью [Текст] / Е. И. Исаченков. – М.: Машиностроение, 1967. – 364 с.

3. Фролов Е. А. Пути повышения качества технологической системы пневмоударной штамповки листовых деталей [Текст] / Е. А. Фролов, И. В. Манаенков, С. С. Тимофеев, Т. В. Дякова // Удосконалення будівельних колій та перевантажувальних машин: зб. наук. пр. Укр. держ. академії заліз. трансп. – Вип. 88. – Х., 2008. – С. 166 – 172.
4. Мовишович А. Я., Технологические предпосылки получения высокоточных деталей вытяжкой из листа методом пневмоударной штамповки [Текст] / А. Я. Мовишович, Л. Г. Кузнецова, Е. А. Фролов, И. В. Манаенков // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: темат. зб. наук. пр. ДДМА. – Краматорськ, 2009. – С. 352 – 356.

5. Фролов Е. А. Определение показателей качества листовых деталей при ударно-импульсных операциях эластичной средой [Текст] / Е. А. Фролов, А. Л. Комарова, И. В. Манаенков // Вестник национального автомобильно-дорожного университета: сб. науч. тр. Нац. авт.-дор. у-та. – № 54. – Х., 2011. – С. 149 – 153.
6. Пневмоударная и статикодинамическая штамповка листовых деталей упругими средами. [Текст] : монография / Е.А Фролов, А.Я. Мовшович, И.В. Манаенков А.Ф. Тарасов, Л.Л. Роганов. – Харьков : Изд.центр НТУ «ХПИ», 2010. – 268 с.

References (transliterated)

1. Romanovskiy V. P. *Spravochnik po kholodnoy shtampovke* [Reference book on cold stamping]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1979. 520 p.
2. Isachenkov Ye. I. *Shtampovka rezinoy i zhidkostyu* [Stamping with rubber and liquid]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1967. 364 p.
3. Frolov Ye. A., Manaenkov I. V., Timofeev S. S., Dyakova T. V. Puti povysheniya kachestva tekhnologicheskoy sistemy pnevmoudarnoy shtampovki listovykh detaley [Ways to improve the quality of the technological system of pneumatic impact punching of sheet metal parts]. *Zb. nauk. pr. UkrDAZT. Udoskonalennja budivelnjnykh kolij ta perevantazhuvaljnykh mashyn* [Improvement of construction lines and reloading machines]. Kharkov, Ukrainian State Academy of Railway Transport Publ., 2008, no. 88, pp. 166–172.

4. Movshovich A. Ya., Kuznetsova L. G., Frolov Ye. A., Manaenkov I. V. Tekhnologicheskie predposylki polucheniya vysokotochnykh detaley vytazhkoj iz lista metodom pnevmoudarnoy shtampovki [Technological preconditions for obtaining high-precision details by drawing from sheet by the method of pneumatic impact punching]. *Temat. zb. nauk. pr. DDMA. Udoskonalennja procesiv i obladnannja obrobky tyskom v metalurghiji i mashynobuduvanni* [Improvement of processes and equipment for pressure treatment in metallurgy and machine building]. Kramatorsk, Donbass State Machine-Building Academy Publ., 2008, no. 88, pp. 166–172.
5. Frolov Ye. A., Komarova A.L., Manaenkov I.V. Opredelenie pokazateley kachestva listovykh detaley pri udarno-impul'snykh operatsiyakh elastichnoy sredoy [Determination of quality indicators of sheet parts under shock-pulse operations with elastic material] // *Vestnik natsionalnogo avtomobilno-dorozhnogo universiteta* [Bulletin of the National Automobile and Highway University]. Kharkov, NAHU Publ., 2011, no. 54, pp. 149–153.
6. Frolov Ye. A. Movshovich A.Ya., Manaenkov I.V., Tarasov A.F., Roganov L.L. *Pnevmoudarnaya i statikodinamicheskaya shtampovka slozhnorelefnnykh listovykh detaley uprugimi sredami* [Pneumatic and static-dynamic stamping of complex embossed sheet parts by elastic media.] Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2010. 268 c.

Надійшло (received) 03.11.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Дослідження впливу зусилля притискання заготовки на якість процесу витягування високошвидкісним штампуванням / Є. А. Фролов, С. Г. Ясько, Н. Н. Мороз, Ю. С. Саленко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – №35(1257). – С. 68–72 – Библиогр.: 6 назв.– ISSN 2519-2671

Дослідження впливу зусилля притискання заготовки на якість процесу витягування високошвидкісним штампуванням / Е. А. Фролов, С. Г. Ясько, М. М. Мороз, Ю. С. Саленко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – №35(1257). – С. 67–72 – Библиогр.: 6 назв.– ISSN 2519-2671

Investigation of the effect of pressing pressure on the quality of the stretching process by high-speed stamping / Ye. A. Frolov, S. G. Yasko, M. M. Moroz, Yu. S. Salenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Innovative technologies and equipment of materials processing in engineering and metallurgy. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2017. – No 35(1257). – P. 68–72. – Bibl.:6. – ISSN 2519-2671

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Фролов Євгеній Андрійович – доктор техн. наук, професор, завідувач кафедри технології машинобудування, ПолтНТУ ім. Юрія Кондратюка, м. Полтава, Україна. E-mail: frolov.polntu@gmail.com; ORCID: 0000-0002-2691-5386.

Фролов Евгений Андреевич – доктор техн. наук, профессор, заведующий кафедрой технологии машиностроения, ПолтНТУ им. Юрия Кондратюка, г. Полтава, Украина. E-mail: frolov.polntu@gmail.com; ORCID:0000-0002-2691-5386.

Frolov Evgeniy Andreevych, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of mechanical engineering technology, Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University, Poltava, Ukraine; e-mail: frolov.polntu@gmail.com; ORCID:0000-0002-2691-5386.

Мороз Микола Миколайович – доктор техн. наук, професор, завідувач кафедри транспортні технології КрНУ ім. Михайла Остроградського, м.Кременчук, Україна, e-mail: avtotr@kdu.edu.ua.

Мороз Николай Николаевич – доктор техн. наук, профессор, заведующий кафедрой транспортные технологии КрНУ им. Михайла Остроградского, г. Кременчуг, Украина, e-mail: avtotr@kdu.edu.ua.

Moroz Nikolay Nikolaevich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of transport technologies, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Kremenchuk, Ukraine.

Саленко Юлія Сергіївна – доктор техн. наук, професор кафедри конструювання машин і технологічного обладнання КрНУ ім. Михайла Остроградського, м.Кременчук, Україна.

Саленко Юлія Сергеевна – доктор техн. наук, професор кафедры конструирования машин и технологического оборудования КрНУ им. Михаила Остроградского, г. Кременчук, Украина.

Salenko Yulia Sergeevna – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of designing machines and technological equipment, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Kremenchuk, Ukraine.

Ясько Станіслав Георгійович – аспірант, ПолтНТУ ім. Юрія Кондратюка, Полтава, Україна. E-mail: s.g.yasko@gmail.com; ORCID: 0000-0001-6228-705X.

Ясько Станислав Георгиевич – аспірант, ПолтНТУ ім. Юрія Кондратюка, Полтава, Украина. E-mail: s.g.yasko@gmail.com; ORCID:0000-0001-6228-705X.

Yasko Stanislav Georhyevych, postgraduate Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University, Poltava, Ukraine; e-mail: s.g.yasko@gmail.com; ORCID:0000-0001-6228-705X.

УДК 621.9

В. Л. ХАВИН, И. С. ЛАВРИНЕНКО, С. Ю. ШЕРГИН**МОДЕЛИРОВАНИЕ УСИЛИЙ ПРИ СВЕРЛЕНИИ КОСТНОГО МАТЕРИАЛА**

Розглянуто підхід до моделювання зусиль при свердлінні трубчастої кістки. Додатково до головних складових осевого зусилля і крутного моменту обчислюються компоненти, які пов'язані з прониканням передньої частини інструменту в оброблюваний матеріал і опором евакуації зрізаного матеріалу. Для визначення головних складових зусиль використовуються залежності для питомої роботи руйнування кісткового матеріалу. Опір евакуації враховується моделлю гранульованого середовища, що рухається з тертям уздовж поверхонь свердла і отвору. Показано, що модель достовірно відбиває зростання зусиль за рахунок опору евакуації зрізаного матеріалу.

Ключові слова: свердління, трубчаста кістка, осеве зусилля, момент, що крутить, питома робота руйнування, зусилля опору евакуації.

Рассмотрен подход к моделированию усилий при сверлении трубчатой кости. Дополнительно к главным составляющим осевого усилия и крутящего момента вычисляются компоненты, связанные с внедрением передней части инструмента в обрабатываемый материал и сопротивлением эвакуации срезанного материала. Для определения главных составляющих усилий используется зависимости для удельной работы разрушения костного материала. Сопротивление эвакуации учитывается моделью гранулированной среды,двигающейся с трением вдоль поверхностей сверла и отверстия. Показано, что модель достоверно отражает рост усилий за счет сопротивления эвакуации срезанного материала.

Ключевые слова: сверление, трубчатая кость, осевое усилие, крутящий момент, удельная работа разрушения, усилия сопротивления эвакуации.

Going is considered the design of efforts at boring of tubular bone. The main constituents of axial effort and twisting moment are presented as efforts of cutting at power co-operation of cutting edges of drill with the processed material. The additional components of axial effort and twisting moment are related to introduction of forehand of instrument in the processed material and resistance of evacuation of the cut away material from opening. Through penetration of drill through a tubular bone plugs in itself the row of the successive stages of co-operation of instrument with bone material. Amount of material (volume), of the instrument cut away for one turn, determined on the basis of the schematized geometry of the cut away volumes. The volume of the cut away material for one turn of instrument is determined as dependence on speed of axial serve on a turn and geometries of cutting part of instrument. The model of the pressed element shaving from bone material is presented as an array of granular environment, moving in the conditions of presence resistance (friction) along the surfaces of evacuation ditches of drill and opening surface like the process of extrusion of some polymers. Comparison of results upon settlement of axial effort and twisting moment with experimental data showed that the offered model for certain reflected the height of axial effort at presence of resistance of evacuation of the cut away material. A model allows more exactly to forecast the size of efforts both in initial and eventual phases of boring process and in the phase of the stationary boring.

Keywords: boring, tubular bone, axial effort, twisting moment, specific work of destruction, effort of resistance of evacuation.

Введение. Сверление костного материала применяется в различных областях хирургии – ортопедии, нейрохирургии, стоматологии и др. Отверстия в костном материале формируются при помощи специальных хирургических свёрл.

Анализ последних исследований и литературы. Прогнозирование и контроль усилий, возникающих в процессе сверления костного материала, играет важную роль для процесса хирургического вмешательства. Причина этого – влияние уровня усилий на качество и безопасность хирургической операции. Вследствие этого, при разработке ортопедических имитационных систем для хирургических тренажеров определяющее значение приобретают адекватные модели для оценки осевого усилия и крутящего момента. Как и при моделировании усилий, возникающих в процессе сверления металлов [1], к моделированию осевой силы и крутящего момента для процессов сверления костного материала применяются различные подходы и методы. Следует отметить, что аналитическому моделированию усилий и крутящего момента, возникающих при сверлении костного материала, посвящено сравнительно небольшое число работ [2–6]. Механистическое моделирование основывается на аналитическом и численно-аналитическом описании кинематики процесса сверления и процесса отделения костного материала. Сравнительно небольшое

количество констант в механистических моделях определяется путем ограниченной серии специальных калибрующих экспериментов.

Цель работы – совершенствование теоретико-экспериментальной модели расчета осевого усилия и крутящего момента при сверлении трубчатой кости.

Постановка задачи. Рассматривается моделирование процесса сверления трубчатой кости, состоящей из двух основных частей – наружной твердой оболочки (compact, cortical bone) и сердцевины (trabecular, cancellous bone). Наружная оболочка и внутренняя пористая часть кости имеют различную структуру и плотность и представляют собой анизотропные, неоднородные материалы, имеющие существенно различающиеся механические характеристики. В большинстве работ при моделировании процессов деформирования и разрушения кости применяются изотропные, однородные модели с экспериментально определяемыми приведенными (усредненными) механическими характеристиками. Вследствие того, что оболочка кости и ее сердцевина имеют существенно различающиеся механические характеристики прочности и пластичности, при сверлении кости наблюдается существенное различие в значениях осевой силы и крутящего момента, действующих на инструмент в течение рабочего процесса. Предлагаемые модели расчета осевой силы

и крутящего момента основаны на работах [3,4,6,7]. Главные составляющие осевого усилия и крутящего момента представляют собой усилия резания при силовом взаимодействии режущих кромок сверла с обрабатываемым материалом. Дополнительные компоненты осевого усилия и крутящего момента связаны с внедрением передней части инструмента в обрабатываемый материал и сопротивлению эвакуации срезанного материала наружу.

Сквозное проникновение сверла через трубчатую кость включает в себя ряд последовательных этапов взаимодействия инструмента с костным материалом. Количество материала (объем) $A(\tau)$, срезаемого за один оборот инструмента, определяется на основе схематизированной геометрии срезаемых объемов. Объем срезаемого материала за один оборот инструмента определяется в виде зависимости от скорости осевой подачи на оборот f и геометрии режущей части инструмента и обозначается $A_1(\tau)$ для наружной оболочки кости и $A_2(\tau)$ – для сердцевинки кости. Путь, пройденный инструментом $S = a_0 \tau$ вычисляется через линейную скорость осевой подачи a_0 и текущее операционное время τ , скорость линейной осевой подачи связана со скоростью подачи на оборот f ($a_0 = f n$), n – скорость вращения инструмента. Компоненты результирующей силы резания, действующей на одну режущую кромку инструмента, прикладываются посередине длины той части режущей кромки, которая находится в контакте с обрабатываемым материалом.

Вследствие того, что костный материал представляет собой неоднородное анизотропное тело, то для определения интегральных параметров процесса, таких как крутящий момент и осевое усилие наиболее приемлемым представляется использование экспериментальной удельной работы (энергии), затрачиваемой на процесс. Это величина работы (энергии), затрачиваемой на срезание единицы объема материала, обозначаемая U_1 – для наружной оболочки кости и U_2 – для сердцевинки кости.

Известно, что крутящий момент определяется через затрачиваемую мощность следующим образом:

$$T = 0,159 \frac{N}{n}, \quad (1)$$

где T – крутящий момент, Нм, N – мощность, Вт, n – скорость вращения инструмента, об/с. Отношение $\frac{N}{n}$ представляет собой работу, совершаемую за один оборот. С другой стороны, работа, затрачиваемая на процесс резания за один оборот может быть определена по зависимости:

$$U = Au, \quad (2)$$

где A – объем материала, срезаемого за оборот инструмента, u – удельная работа резания.

Подстановка (2) в (1) позволяет получить соотношение, из которого определяется крутящий момент на инструменте:

$$T = 0,159 Au \quad (3)$$

В том случае, если инструмент одновременно срезает материал наружной части и сердцевинки кости зависимость (3) приобретает вид:

$$T = 0,159 [A_1(\tau)u_1 + A_2(\tau)u_2]. \quad (4)$$

При работе только в одном материале одна из компонент в зависимости (4) равна нулю. Так как крутящий момент с достаточной степенью точности может быть записан через равнодействующую главных сил резания, действующих на режущую кромку F_t , то справедливо соотношение:

$$T(\tau) = 2F_t(\tau)r \quad (5)$$

и

$$T = T_1 + T_2, \quad (6)$$

где

$$T_1 = 2F_{t1}r_1, \quad T_1 = 0,159A_1(\tau)u_1$$

$$T_2 = 2F_{t2}r_2 - T_2 = 0,159A_2(\tau)u_2 - (7)$$

составляющие полного крутящего момента, приходящиеся на отделение материала в наружной оболочке кости – (T_1) и сердцевине – (T_2).

Введение экспериментальной связи нормальной (F_p) и главной силы резания (F_t)

$$F_{p11} = k_1 F_{t1}, \quad F_{p2} = k_2 F_{t2} \quad (8)$$

позволяет получить из (5) – (9) полную осевую силу F_1 , действующую на инструмент:

$$F_1(\tau) = 0,159 \left[\frac{k_1 u_1}{r_1(\tau)} A_1(\tau) + \frac{k_2 u_2}{r_2(\tau)} A_2(\tau) \right] \sin \varphi \quad (9)$$

Величина коэффициентов k_1 и k_2 для костного материала находится в диапазоне $0,5 \div 1,0$, а выражения $A_1(\tau)$, $A_2(\tau)$ и $r_1(\tau)$, $r_2(\tau)$ определяются текущим положением инструмента.

Величина удельной работы резания u_1 и u_2 для костного материала зависит от скорости осевой подачи и для низких скоростей вращения инструмента ($n \leq 1200$ об/мин) практически не зависит от этой скорости, что в соответствии с [5] позволяет использовать эмпирические выражения для расчета удельных работ резания:

$$u_i = D_i^* f^{n_i}, \quad i = 1, 2, \quad (10)$$

где D_i^{k*}, n_i – экспериментальные константы, индекс «1» соответствует наружной оболочке кости, «2» – сердцевине кости.

Дополнительно к осевой силе резания $F_1(\tau)$ вследствие внедрения вершины сверла в обрабатываемый материал возникает контактное осевое усилие $F_2(\tau)$, которое в первом приближении может быть определено через твердость обрабатываемого материала [10]:

$$F_2(\tau) = m_i \frac{\pi d_0^2}{4} H_{Bi}, \quad (11)$$

где H_{Bi}, m_i – соответственно твердость и константа костного материала ($m_i = 0,1-0,2$), индекс $i=1$ соответствует наружной оболочке кости, $i=2$ – сердцевине кости.

Результирующая осевая сила для процесса сверления кости определится по зависимости:

$$F_3(\tau) = F_1(\tau) + F_2(\tau), \quad (12).$$

Особенностью процесса сверления костного материала является наличие суставчатой и (или) элементной стружки, которая при эвакуации из отверстия спрессовывается и оказывают сопротивление, что вызывает появление дополнительных эвакуационного осевого усилия и крутящего момента.

Модель спрессованной элементной стружки из костного материала может быть представлена в виде массива гранулированной среды,двигающегося в условиях наличия сопротивления (трения) вдоль поверхностей эвакуационных канавок сверла и поверхности отверстия подобно процессу экструзии некоторых полимеров. В [6] предложено выражение для осевого усилия $F_\Sigma(\tau)$ на инструмент с учетом эвакуационной составляющей:

$$F_\Sigma(\tau) = F_0(\tau) e^{k_F(\tau-\tau^*)}, \quad (13)$$

где $F_0(\tau)$ – начальное значение суммарного, действующего в зоне резания усилия и возникающего в момент заглубления острия на S^* в момент времени $\tau = \tau^*$ ($\tau^* = D/a_0 = S^*/a_0$); $k_F = \eta M a_0 / A_s$ – показатель, определяющий интенсивность осевого сопротивления эвакуации стружки; η – коэффициент связи между осевой и радиальной составляющими внутренних давлений в эвакуированном материале; A_s – площадь эвакуационных канавок сверла; M – результирующий коэффициент, определяющий осевое сопротивление эвакуации. В соотношении (13) введен параметр времени τ^* (или величины заглубления сверла S^*), определяющих момент возникновения усилий сопротивления эвакуации отделенного костного материала. Это связано с наличием периода формирования критического объема спрессованной стружки, который зависит от свойств костного материала и операционных параметров процесса сверления. Зависимость для периода запаздывания

требует проведения специальных экспериментальных исследований.

Обобщенное осевое усилие F_3 с учетом сопротивления эвакуации стружки может быть представлено в виде:

$$F_3(\tau) = F_1(\tau) \Phi(\tau), \quad (14)$$

где функция $\Phi(\tau)$ представляется зависимостями:

$$\begin{cases} \Phi(\tau) = 1, & \tau < \tau^* \\ \Phi(\tau) = e^{k_F(\tau-\tau^*)}, & \tau \geq \tau^* \end{cases} \quad (15)$$

В этом случае результирующее осевое усилие F_Σ с учетом сопротивления эвакуации стружки принимает вид:

$$F_\Sigma(\tau) = F_3(\tau) + F_2(\tau). \quad (16)$$

Наряду с дополнительным осевым усилием, связанным с эвакуацией стружки, появляется дополнительный эвакуационный крутящий момент. В соответствии с подходом, предложенным в [6], выражения для дополнительного крутящего момента подобно выражению (13) представляется в виде:

$$T_2(\tau) = T_0(\tau) \left[e^{k_F(\tau-\tau^*)} - 1 \right],$$

$$T_0 = \frac{D_0 \mu_w l_w}{2M} F^*(\tau) \quad (17)$$

Суммарный крутящий момент определяется как сумма моментов $T_1(\tau)$ и $T_2(\tau)$:

$$T_\Sigma(\tau) = T = 0,159 [A_1(\tau) u_1 + A_2(\tau) u_2] + \frac{D_0 \mu_w l_w}{2M} F^*(\tau) [e^{k_F(\tau-\tau^*)} - 1], \quad (18)$$

Выражение для $F^*(\tau)$ определяется следующим образом:

$$F^*(\tau) = 0, \quad \tau < \tau^*, \quad F^*(\tau) = F_1(\tau), \quad \tau \geq \tau^*. \quad (19)$$

Приведенные соотношения образуют совокупность зависимостей, позволяющих рассчитывать значения осевой силы и крутящего момента, действующих на инструмент.

Численные результаты. Для расчетов использовалась трубчатая коровья кость с толщиной наружной оболочки $S_1 = 10,0$ мм и диаметром внутренней части $S_2 = 25,5$ мм. Инструмент – ортопедическое сверло с наружным диаметром $D = 2,7$ мм.. Данные по геометрии эвакуационной канавки сверла взяты из [4]. Значение параметра η , характеризующего плотность эвакуируемого материала, принималась равным коэффициентам Пуассона для соответствующих частей материала. Данные по характеристикам инструмента и физико-механическим характеристикам обрабатываемого

материала приведены в таблицах 1 и 2. Результаты расчетов по предложенной модели сравнивались с экспериментальными данными из [10] (рис.1).

Таблица 1 --Характеристики инструмента

Геометрические характеристики инструмента		Геометрические характеристики эвакуационной канавки [8]					
Диаметр сверла, D , мм	Угол при вершине, 2φ , град	l_f , мм	l_n , мм	l_r , мм	l_w , мм	θ , град	A_s , мм ²
2,7	90	1,16	1,16	0,29	1,91	26,7	1,46

Таблица 2 – Физико-механические характеристики обрабатываемого материала

	Константы для расчета удельной работы резания, u_i		Константы для расчета силы внедрения инструмента в обрабатываемый материал, F_i	
	$D_i^*, \frac{нМ}{мм^3}$	n_i	$H_i, \frac{Н}{мм^2}$	m_i
Наружная оболочка кости	0,1	-0,63	700	0,1
Внутренняя часть кости	0,01	-0,63	70	0,1

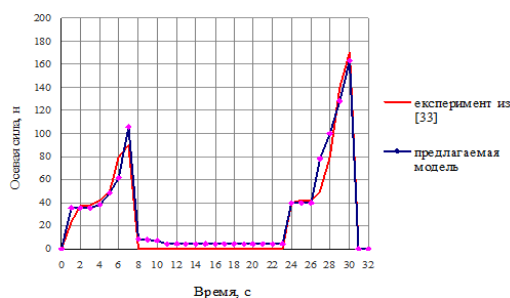


Рис. 1 – Изменение осевого усилия при сквозном сверлении трубчатой коровьей кости со скоростью осевой подачи 0,9 мм/с при скорости вращения 1000 об/мин

Выводы.

1. В работе рассмотрена усовершенствованная теоретико-экспериментальная модель расчета осевого усилия и крутящего момента при сверлении костного материала.

2. Предложенный подход представляет собой усовершенствование модели Macavelia путем определения мощности процесса сверления через работу резания и введения запаздывания эвакуационных усилий.

3. Сравнение результатов расчета осевого усилия с экспериментальными данными Macavelia показало, что предложенная модель достоверно отражает рост осевого усилия из-за сопротивления эвакуации срезанного материала.

4. Усовершенствованная модель позволяет более точно прогнозировать осевое усилие и крутящий момент на всех стадиях процесса сверления кости при наличии сопротивления эвакуации срезанного материала.

Список литературы

1. Chandrasekharan V. A mechanistic model to predict the cutting force system for arbitrary drill point geometry/ V. Chandrasekharan, S. G. Kappor, R. E. DeVor / Journal of Manufacturing Science and Engineering.- 1998, V. 120. – PP. 217–225.
2. Jacobs C. H. A study of the bone machining process-drilling/ C. H. Jacobs, M. H. Pope, J. T. Berry, F. Hoaglund / Journal of Biomechanics. - 1976, V. 9. – PP. 343–349.
3. Wiggins K. L. Drilling of bone / K. L. Wiggins, S. Malkin / Journal of Biomechanics. - 1976, V. 9. – PP. 553–559.
4. Allotta B. A hand-held drilling tool for orthopedic surgery/ B. Allotta, G. Giacalone, L. Rinalde/ JEEE/ASME Transactions on Mechatronics.- 1997, V.2.- No 4. – PP. 218-229.
5. Lee J. Modeling and experimentation of bone drilling forces / J. Lee, B. A. Gozen, O. B. Ozdoganlar / Journal of Biomechanics.- 2012, V.45. – PP. 1076–1083.
6. MacAvelia T. Force and torque modeling for the drilling of bone for use in orthopaedic haptic simulation systems/ T. MacAvelia / Thesis and dissertation. - Ryerson University. - Toronto, Ontario, Canada. – 2012.
7. Melinger J.C. Modeling chip-evacuation forces and prediction of chip clogging in drill / J. C. Melinger, O. B. Ozdoganlar, R. E. DeVor, S. G. Kapoor / Journal of Manufacturing Science and Engineering.- 2002, V. 124. – No3. – PP. 605–614.

References (transliterated)

1. Chandrasekharan V. A mechanistic model to predict the cutting force system for arbitrary drill point geometry/ V. Chandrasekharan, S. G. Kapoor, R. E. DeVor / *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. - 1998, V. 120. - PP. 217–225.
2. Jacobs C. H. A study of the bone machining process-drilling/ C. H. Jacobs, M. H. Pope, J. T. Berry, F. Hoaglund / *Journal of Biomechanics*. - 1976, V. 9.- PP. 343–349.
3. Wiggins K. L. Drilling of bone / K. L. Wiggins, S. Malkin / *Journal of Biomechanics*. - 1976, V. 9.- PP. 553–559.
4. Allotta B. A hand-held drilling tool for orthopedic surgery/ B. Allotta, G. Giacalone, L. Rinalde/ *JEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. - 1997, V.2.- No 4.- PP. 218–229.
5. Lee J. Modeling and experimentation of bone drilling forces / J. Lee, B. A. Gozen, O. B. Ozdoganlar / *Journal of Biomechanics*. - 2012, V.45.- PP. 1076–1083.
6. MacAvelia T. Force and torque modeling for the drilling of bone for use in orthopaedic haptic simulation systems/ T. MacAvelia / *Thesis and dissertation*. - Ryerson University. - Toronto, Ontario, Canada.- 2012.
7. Melinger J.C. Modeling chip-evacuation forces and prediction of chip clogging in drill / J. C. Melinger, O. B. Ozdoganlar, R. E. DeVor, S. G. Kapoor / *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. - 2002, V. 124.- No3.-PP. 605–614.

Поступила (received) 27/10/2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Модельювання зусиль при свердлінні матеріалу кістки / В. Л. Хавін, І. С. Лавриненко, С. Ю. Шергін // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – №35(1257). – С. 73–77 – Библиогр.: 7 назв.– ISSN 2519-2671

Моделирование усилий при сверлении костного материала / В. Л. Хавин, И. С. Лавриненко, С. Ю. Шергин // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – №35(1257). – С. 73–77 – Библиогр.: 7 назв.– ISSN 2519-2671

Modeling of efforts at drilling bone material / V. L. Khavin, I. S. Lavrinenko, S. Y. Shergin // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Innovative technologies and equipment of materials processing in engineering and metallurgy. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2017. – No 35(1257). – P. 73–77. – Bibl.:7. – ISSN 2519-2671

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Хавін Валерій Львович – кандидат технічних наук, професор, завідувач кафедри, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», тел.: (057)-70-761-78, e-mail: VKhavin@kpi.kharkiv.ua

Хавин Валерий Львович – кандидат технических наук, профессор, заведующий кафедрой, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», тел.: (057)-70-761-78, e-mail: VKhavin@kpi.kharkiv.ua

Khavin Valeriy Lvovich – doctor of engineering, professor, head of the department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", tel.: (057)-70-761-78, e-mail: VKhavin@kpi.kharkov.ua

Лавриненко Ігор Сергійович – аспірант, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», тел.: (057)-70-761-78.

Лавриненко Игорь Сергеевич – аспирант, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», тел.: (057)-70-761-78.

Lavrinenko Igor Sergeevich – postgraduate student of National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", tel.: (057)-70-761-78.

Шергін Сергій Юрійович – ст. викладач, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», тел.: 70-761-78, e-mail: Sshergin@kpi.kharkov.ua

Шергин Сергей Юрьевич – ст. преподаватель, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», тел.: 70-761-78, e-mail: Sshergin@kpi.kharkov.ua

Shergin Sergei Yurievich – sr. lecturer National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", tel.: (057)-70-761-78, e-mail: Sshergin@kpi.kharkov.ua

УДК 621.771

В.А. ЧУБЕНКО, А.А. ХИНОЦКАЯ

ВЛИЯНИЕ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ПРОКАТЫВАНИЯ НА ПРЕДЕЛ ТЕКУЧЕСТИ СТАЛИ

Выполнен анализ изменения границы текучести металла при прокатке, исследовано влияние скорости обработки, степени обжатия, температуры прокатывания на сопротивление деформации, что позволило определить новые закономерности и проанализировать их зависимости от режимов прокатки. Приведены рекомендации режимов термомеханической обработки сталей, которые позволяют увеличить эффективность процесса и снизить затраты энергии на пластическую деформацию металла. Сделаны выводы, что полученные результаты доказывают целесообразность практической реализации тех режимов обработки, где предусматривается выполнение окончательных обжатий материалов на железной основе при температурах, которые соответствуют существованию высокотемпературной части ферритного участка.

Ключевые слова: предел текучести металла, пластическая деформация, обжатие, прокатка, затраты энергии, термомеханические режимы, скорость деформации.

Виконано аналіз зміни границі течії металу при прокатуванні, досліджено вплив швидкості обробки, ступеню обтиснення, температури прокатування на опір деформації, що дозволило визначити нові закономірності та проаналізувати їх в залежності від режимів прокатування. Наведені рекомендації режимів термомеханічної обробки сталей, що дозволяють збільшити ефективність процесу та зменшити витрати енергії на пластичну деформацію металу. Зроблено висновки, що отримані результати доводять доцільність практичної реалізації тих режимів обробки, в яких доцільно виконувати кінцеві обтиснення матеріалів на залізній основі при температурах, які відповідають існуванню високотемпературної частини феритної ділянки.

Ключові слова: границя течії металу, пластична деформація, обтиснення, прокатування, витрати енергії, термомеханічні режими, швидкість деформації.

The analysis of the change of the boundary of the metal flow during the rolling process is carried out, the impact of processing speed, compression ratio, rolling temperature on the resistance of the deformation has been investigated, which has allowed to determine the new laws and analyze them depending on the rolling conditions. The recommendations of modes of thermomechanical treatment of steels are given, which allow to increase the efficiency of the process and reduce the energy consumption of plastic deformation of the metal. The obtained results prove the expediency of practical realization of the modes of processing, in which it is expedient to perform the final compression of materials on an iron basis at temperatures which correspond to the existence of a high-temperature part of the ferrite section.

Keywords: metal flow boundary, plastic deformation, compression, rolling, energy consumption, thermomechanical regimes, deformation rate.

Введение. В последние годы в технологии прокатного производства наблюдается переход на более новый качественный этап развития. Это обусловлено многими факторами: от создания, внедрения и развития прогрессивных технологий, к изменению концепции по отношению к прокатному производству. Одним из наиболее важных факторов такого развития есть возможность осуществлять абсолютный контроль за температурно-деформационным процессом при прокатке с целью снижения затрат энергии на процесс.

При обработке металлов давлением исходные материалы изменяют свою форму и размеры, на что затрачивается энергия. Это происходит благодаря способности твердых тел к пластической деформации, которая совершается тогда, когда нагрузки, которые действуют на предмет, достигнут предела текучести. Но эта величина не имеет постоянного значения, на нее действуют такие факторы, как температура обработки, скорость и степень деформации, в результате чего изменяется сопротивление деформации.

Определив более точные способы влияния на предел текучести металла при прокатывании, необходимо изыскать возможность руководить процессом обработки на макроуровне, что обеспечивают снижение границы текучести металла и, соответственно, затрат энергии. Это возможно при определении рациональных термомеханических режимов прокатывания, которые снижают предел текучести.

Анализ последних исследований и публикаций. К настоящему времени создана достаточно цельная, экспериментально и теоретически обоснованная система представлений о пластических деформациях, закономерностях, управляющих ею, о связях микро и макроявлениями, происходящих в нагруженных твердых телах [1, 2, 3, 4, 5, 6]. Пластическая деформация возникает тогда, когда напряжения, вызываемые действием внешних сил, превосходят предел текучести. Изучение изменения предела текучести прослеживается в работах Сузуки [2]. Ранее выведенная зависимость для определения границы текучести Андреюком Л. В. и Тюленевым Г. Г. [4] содержит только произведения всех параметров, которые влияют на сопротивление деформации при прокатывании. В [5] для определения предела текучести используется формула Хензеля-Шпителля. Существует также зависимость, в которой коэффициенты умножены на температуру, степень деформации и скорость деформации соответственно складываются между собой, что возможно дает больше реальную картину поведения границы текучести в очаге деформации [3, 6].

При изменении степени относительной деформации во время обжатия в пределах от 0 до 20÷30 % происходит увеличение границы течения металлов, а потом, при увеличении от 20÷30 % до 70÷80 % степень деформации почти не влияет на течение металла. При тех же температурах и скоростях деформации при степенях обжатия меньших 20÷30 % наблюдается более сильное влияние последнего

параметру и слабое влияние температуры на величину предела течения [4].

По результатам многочисленных исследований В. И. Зюзина, А. В. Третьякова и др. [3] в таблицах приведено базисное сопротивление в эталонных условиях горячей пластической деформации 44 вида разных сталей и сплавов – от низкоуглеродистых к высоколегированным, 5 видов титановых сплавов и 15 видов разных цветных металлов и сплавов, а на графике дополнительно указаны, так называемые термомеханические коэффициенты, которые отображают в конкретных условиях влияние на сопротивление деформации температуры, скорости и степени деформации образцов.

Кроме того, по результатам экспериментальных исследований В. И. Зюзиным, предложены удобные для расчетов структурно-однотипные эмпирические формулы [5] сопротивления пластической деформации углеродной стали 45 и семи разных легированных сталей с учетом основных факторов прокатывания.

При холодной пластической деформации, в том числе при прокатывании, граница текучести зависит главным образом от природы и качества металла, общей степени деформации и мало зависит от скорости деформации.

По результатам исследований В. И. Зюзиным и А. В. Третьяковым [5] построены графики и полученные эмпирические формулы временного сопротивления, предела текучести, твердости по Бринеллю при холодной пластической деформации 58 видов углеродных и легированных сталей и сплавов, 10 видов титановые сплавы, 59 цветные металлы и сплавы, 3 тугоплавких металлов и 4 биметаллов. Кроме того, из этих 134 формул созданы удобные для расчетов обобщенные формулы за группами сталей и сплавов, в том числе для углеродных сталей – две, для легированных сталей и сплавов – четыре, для цветных (на основе меди) сплавов и биметаллов – четыре формулы.

Затраты энергии на прокатывание зависят от величины границы текучести материала, степени деформации, скорости и температуры обработки, которые в свою очередь влияют на точность изделия. Поэтому дальнейшее исследование взаимосвязи и взаимозависимости этих параметров – это задача актуальная.

Цель исследования. Определить рациональные термомеханические режимы прокатывания, которые позволяют уменьшить затраты энергии на обработку.

Задачи исследования.

1. Проанализировать изменение предела текучести в зависимости от режимов прокатывания и определить рациональное влияние скорости и степени обжатия на величину сопротивления деформации для различных температур прокатывания.

2. Выявить зависимость между объемным расширением металла и его теплосодержанием.

3. Привести практические рекомендации термомеханических режимов прокатывания, которые позволят уменьшить затраты энергии на прокатывание.

Методика проведения исследования. Зависимость между величинами расширенного объема стали и ее теплосодержанием является прямой (рис. 1), которая описывается уравнением [8]:

$$V_t = 2,44 \cdot 10^{-5} \cdot i_t + 1, \quad (1)$$

где V_t – объем стали при температуре $t^\circ\text{C}$, м^3 ;

i_t – теплосодержание стали при температуре $t^\circ\text{C}$, кДж/кг .

Для дальнейших исследований приводим к одной единице измерения работы теплового расширения и сжатия напряжения текучести. Определив плотность стали при 20°C равной $\rho_{20} = 7750 \text{ кг/м}^3$, рассчитаем плотность при разных температурах ρ_t , а переведем кДж в кгм , выразим в кгм/м^3 .

Работу напряжения текучести определяем, определив расстояние, на которое необходимо сжимать расширенную сталь, чтобы ее объем не увеличился [9]. Это расстояние является кубический корень из объема стали. Следовательно, работа напряжения текучести равна [8]:

$$A_t = \sigma_{t0,2} \cdot 3 \sqrt[3]{V_t}, \quad (2)$$

где A_t – работа напряжения текучести при $t^\circ\text{C}$, кгм/м^3 ;

$\sigma_{t0,2}$ – напряжения текучести при температуре стали $t^\circ\text{C}$, кг/м^2 .

Расчеты по формулам позволили получить зависимости, из которых видно, что работа или энергия в объеме стали присутствует преимущественно в виде напряжений текучести до температуры в 600°C .

Результаты исследования влияния термомеханических режимов прокатывания на предел текучести стали. При больших температурах преобладает работа (энергия) сил на тепловое расширение металла. Итак, до 400°C с определенным запасом можно считать, что основное сопротивление деформации оказывается напряжениями в стали, и она меньше коробится, потому, что эти напряжения равномернее распределяются в объеме металла. При больших температурах, вплоть до $1000-1100^\circ\text{C}$ превалируют тепловые расширения, которые неравномерно распределяются в объеме металла и стальные изделия способны коробиться. Для данной рядовой среднеуглеродистой стали температуру $1200-1300^\circ\text{C}$ можно считать предельными, ибо при высоких температурах уже намечается увеличение объема стали за счет ее расплавления [8].

Обработка экспериментальных результатов выполнялась решением уравнения:

$$\sigma_T = At + B\varepsilon + Cu \quad (3)$$

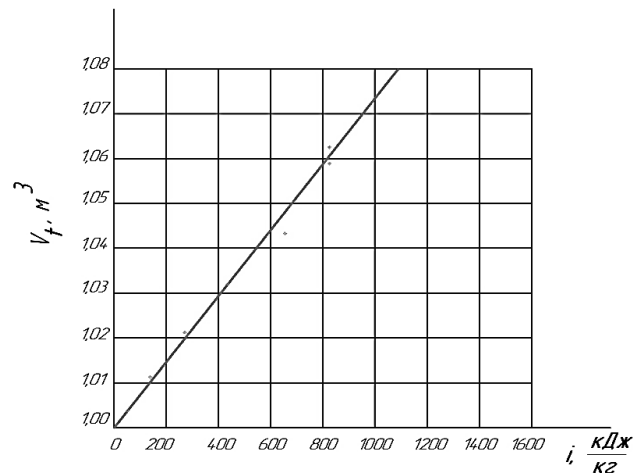


Рис. 1 – Зависимость между объемным расширением (V_t) и теплосодержанием стали по формуле (2)

Экспериментальные данные подставлялись на место σ_t , t , ε , u и определялись коэффициенты A , B , C . Из массива 282 уравнений коэффициенты A , B и C менялись соответственно в пределах $\Delta A = 600-1200^\circ\text{C}$, $\Delta B = 5-80\%$, $\Delta C = 10,4-102$. Итак, наименьший диапазон изменений наблюдается при параметре температура, при большей степени деформации. Это объясняется увеличением диапазонов изменений параметров: t : ε : $u = 2:16:10^6$.

Для дополнительного изучения влияния скорости деформации u на предел текучести σ_t построили график зависимости $\log C$ от $\log u$, который оказался прямым, уравнения которой представляет степень коэффициента при u в уравнениях (3).

Исследование очага деформации обнаруживает, что рассмотренная скорость деформации u не полностью характеризует процесс деформации металла при прокатывании. Эта величина однозначно определяет быстроту вертикального опускания образующей валков вместе с контактной поверхностью металла, вследствие чего создается давление в очаге деформации. Указанную работу выполняют крутящие моменты валков, и она является статьей энергетического баланса очага деформации, которая тратится именно на деформацию при обработке давлением, т.е. на уширение и удлинение металла через боковые свободные поверхности очага деформации.

Кроме этого, подведена энергия превращается в тепло почти полностью вследствие адиабатического сжатия металла, что увеличивает пластичность металла и уменьшает ее вязкость. Это облегчает вытекание металла из очага деформации, валки при устоявшемся режиме прокатывания не буксуют, а имеют температуру поверхности, меньшую температуры поверхности заготовки, которая в контактах твердеет, обеспечивая необходимое сцепление металла с валками.

Учитывая, что критерий пластичности λ_p имеет свойство аддитивности, трудно согласиться с желанием описывать влияние степени и скорости деформации и температуры на предел текучести

металлов, в виде произведения степенных функций [4, 5]. Но массив с 66 видов сталей, пластичность которых приведена в работах [4, 5] достаточно объемный, чтобы его обработать современными научными методами [7].

Выполнив реструктуризацию уравнения [4] получили возможность отделить влияние степени и скорости деформации от воздействия температуры, исходной величины предела текучести σ_0 и коэффициента S , близкого к 1 на величину предела текучести:

$$\sigma_u = S\sigma_0 u^a (10\varepsilon)^b \left(\frac{t}{10^3}\right)^{-c} \cdot [4] \quad (4)$$

$$\lg \sigma_u = \lg S + \lg \sigma_0 + a \cdot \lg U + b + b \cdot \lg \varepsilon - c \cdot \lg t + 3c;$$

$$\lg \sigma_u = (\lg S + \lg \sigma_0 + 3c - c \cdot \lg t) + (a \cdot \lg U + b + b \cdot \lg \varepsilon). \quad (5)$$

При постоянных значениях $u = 1 \text{ с}^{-1}$; $\varepsilon = 0.2$; значениях S, σ_0, a, b, c , из таблиц [2], рассчитали величины σ_u при температурах 800°C и 1300°C .

Считая первую сумму-разницу фактором влияния температуры и исходной прочности стали, а вторую сумму – фактором влияния степени и скорости деформации определили значение предела текучести стали σ_u , как произведение факторов и как их сумму.

Обнаружено, что почти при одинаковом значении второго фактора при температурах 800°C и 1300°C , значение других факторов достаточно существенно различаются (в 5 раз второй больше). Объяснение этому можно найти на рисунке 3, сопоставив зависимость степеней в воздействующих факторах от исходной прочности σ_0 .

В результате исследования выяснилось, что при температуре 800°C сумма факторов большая их произведения, а при 1300°C , наоборот, произведение больше суммы (рис. 2):

при 800°C :

$$\sigma_{\text{исум}}^{800} = \sigma_{\text{ипр}} \pm 0,5,$$

при 1300°C :

$$\sigma_{\text{исум}}^{1300} = 0,96 \cdot \sigma_{\text{ипр}} - 0,62.$$

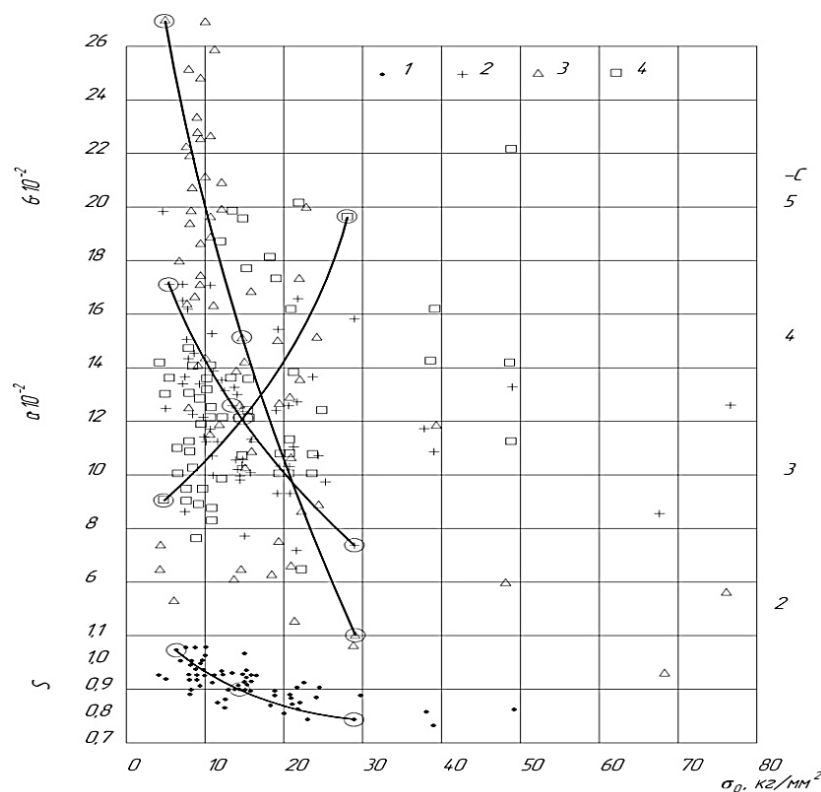


Рис. 2 – Зависимости постоянных величин в уравнении $\sigma_u = S \cdot \sigma_0 \cdot U^a \cdot (10\varepsilon)^b \cdot \left(\frac{t}{1000}\right)^{-c}$; σ_0 : 1 – $S = f(\sigma_0)$; 2 – $a = f(\sigma_0)$; 3 – $b = f(\sigma_0)$; 4 – $c = -f(t)$ при значениях $\sigma_0 \cdot U = 1 \text{ c}^{-1}$; $\varepsilon = 0.1$ и $t = 1000^\circ\text{C}$

Графическая зависимость между пределом течения, которая получена решением уравнений (4) и (5) показано на рис. 3, где показано взаимное влияние величин, полученных в результате расчетов как суммы и как произведения термомеханических параметров.

Исследования показали, что более адекватно расчетно-аналитическими методами отражают зависимость предела текучести от температуры, скорости и степени деформации через сумму влияния этих факторов, а не через произведение.

Данные результаты подтверждают целесообразность практической реализации тех режимов термомеханической обработки, в которых предусматривается выполнение окончательных обжатий материалов на железной основе при температурах, которые соответствуют существованию высокотемпературной части ферритного участка, то есть ниже температуры преобразования $\alpha \rightarrow \gamma$. Следует

напомнить, что прочность и пластичность при обработке α – железа при 760 до 860°C имеют примерно те же значения, что и при обработке γ – железа в диапазоне 950 до 1050°C . Таким образом, совершая последний пропуск при горячей прокатке после охлаждения от обычных температур деформации примерно на 200°C , приходится мало менять усилия горячей деформации. Ожидаемое увеличение прочности при комнатной температуре от использования такого приема равно примерно 10 кгс/мм^2 , если при охлаждении будет предупреждена рекристаллизация [9], что обеспечивает уменьшение затрат энергии на нагревание при прокатывании. Полученные результаты показывают целесообразность практической реализации тех режимов обработки, где предусматривается выполнение окончательных обжатий материалов на железной основе при температурах, которые соответствуют существованию высокотемпературной части ферритного участка.

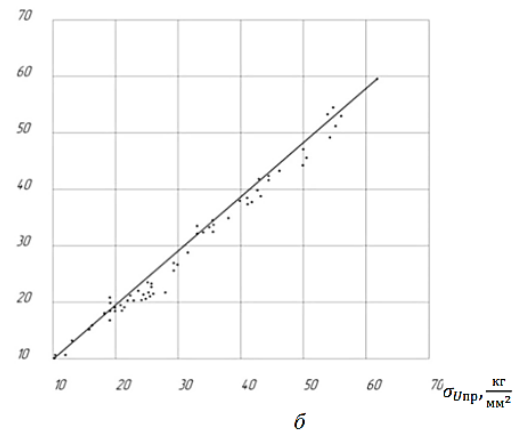
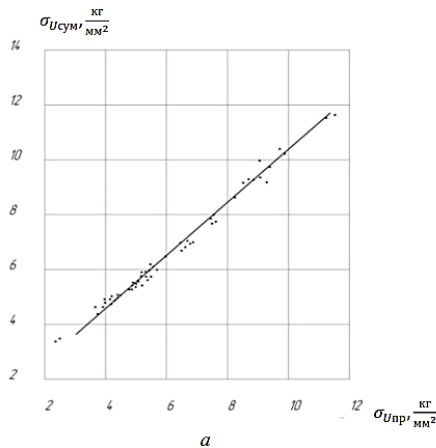


Рис. 3. Зависимости между величинами предела текучести сталей, выраженных суммой и произведением воздействующих факторов при температуре: а – 1300 °С; б – 800 °С

Выводы.

1. Проанализировано влияние режимов прокатывания на изменение предела текучести, что позволило получить графики зависимостей сопротивления деформации, которые позволяют определить рациональные режимы термомеханической обработки. Сравнение этих результатов показывает, что увеличение предела текучести сталей при повышении температуры от 800 °С до 1300 °С более адекватно отражают воздействие температуры, скорости и степени деформации на предел текучести через сумму влияния этих факторов, а не через произведение. 2. Выявлено зависимость между объемным расширением металла и его теплосодержанием, что позволило определить рациональную температуру прокатывания, обеспечивающую снижение затрат энергии. 3. Приведены практические рекомендации режимов термомеханической обработки сталей, которые позволяют увеличить эффективность процесса и улучшить качество изделия, которые заключаются в целесообразности выполнять окончательные обжатия при прокатывании материалов на железной основе на температурах, какие соответствуют существованию высокотемпературной части ферритного участка, что позволяет уменьшить затраты энергии на прокатывание.

Список литературы

1. Kodzhaspurov G.E.. Effect of thermo Vmechanical processing on structure and corrosion-mechanical properties of AISI 321 STEEL./ Kodzhaspurov G.E., Rudskoy A. I., Rybin V. V// Advanced Materials Research. –Vols. 89-91. – 2010. – P. 769–772.
2. Studiers on the flow stress or metals / Suzuki H., Hashizume S., Yabuki Y. et al. //Institute of Industrial Scienke. The University of Tokyo. Azabu, Tokyo. – 1968. – V.18. – № 3. – P. 139–240.
3. Старченко Д. И. Динамика позадвжньої прокатки. Навч. посібн // Старченко Д. И. Київ: “ІСДО”. 1995. – 384 с.
4. Старченко Д.И. – Влияние неравномерности давления на работу и момент прокатки. Теория прокатки/ Старченко Д.И. //Материалы конференции по теоретическим вопросам прокатки. М.: Металлургиздат, 1962. – С.514–519.
5. Thilo Spittel. Ferrous Alloys. V.2/ThiloSpittel, Marlene Spittel . New York: Springer, 2009. – 800 p.

5. Взаємодія технологічних параметрів в осередку деформації при сталому процесі прокатування/ М.М. Бережний, В.А. Чубенко, А.А. Хіноцька, А. Шепель, В. Чубенко //Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Тематичний випуск: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2013 р. – № 43. – С. 36–41.
4. 7.Chiguirinskiy V.V. A Generalised Theory of Plasticity [Text]// Materials and Technology. Institute of Metals and Technology. Liubljana, Slovenij. POB 431, 2010. – P. 141–145.
5. 8.Андрейук Л. В. Аналитическая зависимость сопротивления деформации металла от температуры, скорости и степени деформации. / Андрейук Л. В., Тюленев Г. Г.// “Сталь”, 1972. – с. 825 – 828.
4. Набуття сталю реологічних властивостей в осередку деформації при прокатуванні. Монографія/ М.М.Бережний, В.А.Чубенко, А.А.Хіноцька. – Кривий Ріг: Діонат (ФOP Чернявський Д.О.), 2014. – 148 с.

Bibliography (transliterated)

1. Kodzhaspurov G.E.. Effect of thermo Vmechanical processing on structure and corrosion-mechanical properties of AISI 321 STEEL./ Kodzhaspurov G.E., Rudskoy A. I., Rybin V. V// Advanced Materials Research. –Vols. 89-91. – 2010. – P. 769–772.
2. Studiers on the flow stress or metals / Suzuki H., Hashizume S., Yabuki Y. et al. //Institute of Industrial Scienke. The University of Tokyo. Azabu, Tokyo. – 1968. – V.18. – No 3. – P. 139–240.
3. Starchenko D. I. Dynamika pozdovzhn'oyi prokatky. Navch. posibn // Starchenko D. I. Kyiv: “ISDO”. 1995. – 384 p.
4. Starchenko D.Y. – Vliyanye neravnomernosti davleniya na rabotu y moment prokatky. Teoryya prokatky/ Starchenko D.Y. //Materiyaly konferentsyy po teoretycheskym voprosam prokatky. M.: Metallurhyzdat, 1962. – P. 514–519.
5. Thilo Spittel. Ferrous Alloys. V.2/ThiloSpittel, Marlene Spittel . New York: Springer, 2009. – 800 p.
6. Vzeyemodiya tekhnolohichnykh parametriv v osередku deformatsiyi pry stalomu protsesi prokatuvannya/ M.M. Berezhnyy, V.A. Chubenko, A.A. Khinots'ka, A. Shepel', V Chubenko //Visnyk Natsional'noho tekhnichnoho universytetu «Kharkiv's'kyi politekhnichnyy instytut». Tematychnyy vypusk: Novi rishennya v suchasnykh tekhnolohiyakh. – Kharkiv: NTU «KhPI». – 2013 r. – No 43. – P 36–41.
7. Chiguirinskiy V.V. A Generalised Theory of Plasticity [Text]// Materials and Technology. Institute of Metals and Technology. Liubljana, Slovenij. POB 431, 2010. – P. 141–145.
8. Andreyuk L. V. Analytycheskaya zavysymost' soprotivleniya deformatsyy metalla ot temperatury, skorosty y stepeny deformatsyy. / Andreyuk L. V., Tyulenev H. H// “Stal””, 1972. – p. 825 – 828.
9. Nabuttya stallyu reolohichnykh vlastyvostey v osередku deformatsiyi pry prokatuvanni. Monohrafiya/ M.M.Berezhnyy, V.A.Chubenko, A.A.Khinots'ka. – Kryvyy Rih: Dionat (FOP Chernyavskyy D.O.), 2014. – 148 p.

Поступила (received) 15.11.2017

Бібліографічний опис/Библиографическое описание/ Bibliographic descriptions

Вплив термомеханічних режимів прокатування на границю текучості сталі / В.А.Чубенко, А.А.Хіноцька // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – №35(1257). – С. 78–83 – Библиогр.: 9 назв. – ISSN 2519-2671

Влияние термомеханических режимов прокатывания на предел текучести стали/В.А.Чубенко, А.А. Хиноцкая // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – №35(1257). – С. 78–83 – Библиогр.: 9 назв. – ISSN 2519-2671

Influence of thermomechanical rolling modes at the steel limit range / V.A.Chubenko, A.A. KHinotskaya // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Innovative technologies and equipment of materials processing in engineering and metallurgy. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2017. – No 35(1257). – P. 78–83. – Bibl.: 9. – ISSN 2519-2671

Відомості про авторів/Сведения об авторах/ About the Authors

Чубенко Вікторія Анатоліївна – кандидат технічних наук, доцент, ДВНЗ «Криворізький національний університет», доцент кафедри металургії чорних металів та ливарного виробництва, тел.: 0507472823, e-mail: victoria_4@rambler.ru

Чубенко Виктория Анатольевна – кандидат технических наук, доцент, ДВНЗ «Криворожский национальный университет», доцент кафедры металлургии черных металлов и литейного производства, тел.: 0507472823 e-mail: victoria_4@rambler.ru

Chubenko Victoria Anatolievna – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Krivoy Rog National University, tel.: 0507472823, e-mail: victoria_4@rambler.ru

Хіноцька Алла Анатоліївна – старший викладач кафедри металургії чорних металів та ливарного виробництва ДВНЗ «Криворізький національний університет»

Хиноцкая Алла Анатольевна – старший преподаватель кафедры металлургии черных металлов и литейного производства ДВНЗ «Криворожский национальный университет»

Khinotskaya Alla Anatolievna – Senior Lecturer of Department of Iron Metallurgy Metals Krivoy Rog National University

УДК 621.778.04

О.О. ШАПОВАЛ

РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА ЗАГОТОВОК ПЕРІОДИЧНОГО ПРОФІЛЮ ВІБРАЦІЙНИМ ВОЛОЧІННЯМ

Отримання заготовок періодичного профілю з нікелевих і титанових сплавів є самостійною задачею в загальній проблемі вдосконалення технології виробництва лопаток. Виявлено що при певних схемах і режимах вібраційного деформування (зокрема, при віброволочінні) спостерігається ефект періодичної зміни діаметра прутка або проволочки по його вісі. Встановлено що ефект періодичної зміни діаметра прутка або проволочки при віброволочінні пов'язане з фрикційними коливаннями; втратою стійкості при деформації як при виникненні напружень плинності в матеріалі прутка, так і при утворенні «шийки», а також як результат дії сил інерції.

Ключові слова: вібраційне волочіння, циклічний підпір, періодичний профіль, формоутворення, інертні сили, поршень, який самовивертається.

Получение заготовок периодического профиля из никелевых и титановых сплавов является самостоятельной задачей в общей проблеме совершенствования технологии производства лопаток. Выведено что при определенных схемах и режимах вибрационного деформирования наблюдается эффект периодического изменения диаметра прутка по его оси. Установлено что эффект периодического изменения диаметра прутка или проволоки при виброволочении связан с фрикционными колебаниями, потерей устойчивости при деформировании, а также как результат действия сил инерции.

Ключевые слова: вибрационное волочение, циклический подпор, периодический профиль, формообразование, инертные силы, самовыворачивающийся поршень.

Manufacturing periodic profile bars of nickel and titanium alloys is an independent task in the general problem of improving blade manufacturing technology (single-locked, double-locked). It is found that under certain schemes and vibrational deformation modes (in particular, when vibrodrawing) the effect of periodic change of the bar or wire diameter along its axis is observed. It was found that the effect of the periodic variation of the diameter of the rod or wire at vibrodrawing is associated with friction fluctuations, loss of stability during deformation both during the yield stress in the bar material and the formation of a "neck", and also as a result of the action of the inertia forces. The dependences for determining the conditions of the unstable strain and stabilizing the process of obtaining a periodic profile by controlling the parameters of the vibrodrawing process are obtained. the production of billets of periodic profile from nickel and titanium alloys is an independent task in the general problem of improving the technology of production of blades (single-blade, two-slot). It is advisable to carry out control over the properties of the obtained products by methods of nondestructive testing.

Keywords: vibration drawing, cyclic support, periodic profile, forming, inert forces, self-unscrewing piston.

Вступ. Виробництво заготовок періодичного профілю під штампування турбінних лопаток з важкодеформованих нікелевих та титанових сплавів надзвичайно актуально та перспективно. Традиційна технологія виготовлення заготовок під штампування лопаток, наприклад, з жароміцного нікелевого сплаву ЖС6КП з прутка діаметром 40-50 мм, включає гарячу прокатку за кілька десятків проходів з проміжковими нагріваннями. Заготовки турбінних лопаток меншого діаметру одержують обробкою різанням на токарних верстатах. Однак коефіцієнт використання металу по цій технології не перевищує 0,05-0,14 [1-4]. Так само заготовки періодичних профілів можна отримати асиметричним прокачуванням металевих порошків з наступною механічною обробкою [5, 6].

Взагалі, отримання заготовок періодичного профілю з нікелевих та титанових сплавів є самостійною задачею в загальній проблемі вдосконалення технології виготовлення лопаток (однозамкових, двозамкових) [7]. Контроль властивостей отриманої продукції здійснюється методами нерозривного контролю [8].

Мета роботи. Розробка технології, її фізичних та теоретичних основ, обладнання та інструменту для виробництва періодичних профілів вібраційним волочінням для потреб авіадвигунобудування.

Матеріал та результати досліджень. Вироби змінного перетину можна отримати формоутворенням в умовах надпластичності. Основні переваги способу

пов'язані з великою деформаційною здатністю надпластичних матеріалів, безконтактними умовами деформування та високою стійкістю процесів формозмінення. Ці вироби отримують за умови, що одна з швидкостей, що визначають кінематику процесу, постійна, а друга – змінюється за заданою програмою. Спосіб ефективний в умовах малосерійного виробництва з широким асортиментом продукції [9, 10]. Промислове освоєння цього процесу затримується недовіркою знань про формоутворення та кінематику осередка деформації, а також низькою його продуктивністю.

Ефективність та цілеспрямованість промислового застосування процесу волочіння з використанням звукових та ультразвукових частот діапазону доведено роботами багатьох дослідників [1-12]. Пружинний характер деформування при вібрації інструмента або оброблюваного металу призводить до ряду позитивних факторів інтенсифікуючого процесу металообробки. При певних схемах та режимах вібраційного деформування (зокрема, при вібропровідності) спостерігається ефект періодичної зміни діаметра стрижня або проволочки по його вісі. З одного боку, це можна оцінити як негативний фактор, що призводить до викривлення геометрії отриманого товару. З іншого боку – це відкриває можливості для отримання стрижнів і проволочки періодично повторюваного профілю. У будь-якому випадку при негативній або позитивній оцінці цього фактора цим

процесом необхідно керувати і знати його закони. Можливо це явище можна пояснити аналізом наступних явищ.

I. Реалізація умов, при якій одна з швидкостей, що визначають кінематику процесу, постійна – а інша змінюється за заданим законом. Періодичний профіль заготовки вперше був отриманий при віброволочінні з з поздовжніми коливаннями волоки [2], при певній частоті коливань. Однак існує цілий арсенал способів зміни однієї з швидкостей при віброволочінні: надання волоці або металу, що оброблюється, коливань, спрямованих поперек або навколо (обертальних) вісі волочіння і кутових. Крім того застосовується поєднання поперечних коливань з поздовжніми, волочіння з циклічним підсилювачем, волочіння з пульсуючим протигнатом, ступеневе, двоступеневе вібраційне волочіння, пропускання через два волоки, вібрації в протилежних фазах, триступеневе вібраційне волочіння, протягування через систему з декількох волок, що навантажуються по черзі.

II. Фрикційні автоколивання. В умовах тертя твердих тіл при постійній або періодичній силі тяги спостерігається несплавність ковзання, що супроводжується більш-менш періодичними зупинками. Можливі пояснення нестійкості скидання пов'язані з наявністю падаючої швидкісної характеристики сили тертя або появою так званого стрибка ΔT сили тертя при переході від спокою до ковзання. В процесі кожного стрибка відбувається наростання амплітуди нормально спрямованих асиметричних коливань, що приводять до стискання деформуючого матеріалу. Проявлення цього виду вібрацій у умовах віброволочіння – це порушення закону руху вібраційного інструмента і, як наслідок, періодичність не тільки мікрогеометрії, але й геометрії оброблюваних заготовок. Оцінити характер цього явища можливо при вирішенні задач пружно-пластичного деформування при вібрації з заданням відповідних граничних умов, пов'язаних з законом тертя, що враховують фрикційні автоколивання.

III. Втрата стійкості системи, що деформується. У процесах формування спостерігається чотири типи пластичної стійкості металу, який деформується [3, 9]: полоси ковзання, концентроване зменшення товщини перерізу, вторинні смуги ковзання, хвилястість. У деяких випадках періодичний профіль заготовки може виникнути при виході з осередка деформації у процесі віброволочіння. Характер втрати стійкості відбувається по схемі відмінної від ейлерівської. Зв'язок між деформуючим навантаженням P і характерним переміщенням U виражається кривою вниз. Така залежність P - U спостерігається в умовах розтягу. Висхідна ділянка кривої відповідає стабільним формам рівноваги. В точці максимуму навантаження приймає стаціонарне значення, залишаючись постійним при безкінечно малих змінах U , що відповідають суміжним формам рівноваги. Стан системи в точці максимуму є критичним, а відповідні

значення $P=P_{кр}$ і $U=U_{кр}$ – критичними навантаженнями і переміщеннями. Критичне навантаження $P_{кр}$ співпадає з максимальним, що носить навантаження системи P_{max} . При такому навантаженні можлива локальна втрата стійкості у вигляді локального зменшення товщини перерізу. Задача про стійкість при пружно-пластичному деформуванні вирішується шляхом дослідження руху системи поблизу стану рівноваги. Нестійким є такий стан, при якому малі зміни викликають рух, виводячи систему з рівноважного стану. Оцінити критичну деформацію, при якій процес пластичного розтягування стрижня, стрижень або проволочка стає нестійким, можливо наступним чином.

Розглянемо стрижень, розтягнутий силою $P(t)=P_0 \sin(\omega t - A)$. В свою чергу поточне значення сили

$$P(t) = \sigma F,$$

де σ – нормальна напружка в поперечному перетині;

F – площа перетину;

P_0 – амплітуда сили віброволочіння;

A – початкова амплітуда;

ω – частота вільних коливань віброоборювача.

При виконанні умов (1) утворюється шийка.

$$dP = \left(\frac{d\sigma_1}{d\varepsilon} d\varepsilon + \frac{d\sigma_1}{d\varepsilon} \dot{\varepsilon} d\varepsilon + \frac{d\sigma_1}{dt} dt \right) F + \frac{\sigma_1 dF}{d\varepsilon} d\varepsilon < 0, \quad (1)$$

де σ_1 – нормальна напружка;

ε – деформація,

$\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon_1}{dt} = \frac{d(\ln l)}{dt}$ – швидкість деформації при

подовженні прутка.

Для стрижня, що деформується, можливі різні близькі стани, для яких зменшення перерізу компенсується зростанням напружки внаслідок ущільнення. Однак матеріал деформуючої системи (прутка) має певні порушення, так звані "слабкі місця", як геометричного, так і структурного характеру. Внаслідок локальних відхилень від правильності форми і від умов неоднорідності в одному з місць утворюється і швидко розвивається "шийка". Перетворив рівняння (1), отримуємо умову нестійкого деформування:

$$\frac{d\sigma_1}{d\varepsilon} = \frac{\sigma_1}{(1 + \varepsilon)}. \quad (2)$$

Для матеріалу, який зміцнюється за степеневим законом, реологічні властивості якого описуються залежністю: $\sigma = C \varepsilon^n \dot{\varepsilon}^m$,

де l – довжина осередку деформації;

n – показник деформаційного зміцнення = const,

$m = \frac{d \ln \sigma}{d \ln \dot{\varepsilon}}$ – показник швидкісного зміцнення

матеріалу = const;

$$c = \frac{\sigma_s}{D^{1/n}}, (\sigma_s - \text{статична границя текучості};$$

D, n – постійні величини для даного матеріалу).

При $m = 0$, матеріал не володіє в'язкими властивостями. Отже маємо, що $\varepsilon_{kp} = \frac{n}{1-n}$,

де ε_{kp} – критична деформація.

Формування періодичного профілю виникає за границею деформації під дією з одного боку постійного тягового зусилля, з іншого боку циклічного підпору з противонатягом при вібранізації волокі. В цих умовах, коли заготовка піддається дії розтягуючих і стискаючих навантажень, після досягнення максимального (критичного) навантаження настають умови нестабільної рівноваги. Для кількісного опису та вивчення неравновісних, нестабільних процесів [11] можливо і використання рівноважного підходу до відображення пластичності в рамках термодинамічного та загальносистемного підходу [12]. Для оцінки ступеня деформації заготовки при виході з осередка деформації раціонально використовувати зміну площі поверхні деформуючої заготовки. Використання поверхні заготовки в якості критерія деформації пов'язано з тим, що поверхня взагалі є одним з основних дефектів кристалічної структури [4, 13] і пов'язана з утворенням додаткової поверхні заготовки.

IV. Вплив інерційних сил. При віброволочинні з досить високою швидкістю істотну роль починають грати інерційні сили, виникнення та поширення хвиль у металі, локалізація області пластичної деформації і т. п. Останній фактор може привести до дестабілізації поперечних розмірів отриманого товару. Рівняння нестискаємості та руху мають вигляд:

$$\operatorname{div} \vec{v} = 0, \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left[\frac{T(v_i)}{H(v_i)} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_k} + \frac{\partial v_k}{\partial x_i} \right) + \delta_{ik} \sigma_0 \right] + \rho F_i = \rho \frac{dv_i}{dt}, \quad (4)$$

де v – швидкість переміщення частинок заготовки;
 $T(v_i)$ – інтенсивність дотичних напружень;
 $H(v_i)$ – інтенсивність швидкостей деформацій зсуву;

v_i – швидкість текучості металу при зсуві;

x_i, x_k – просторові координати, де $i = 1, 2, 3$;

$k = 1, 2, 3$ – вільні індекси;

δ_{ik} – символ Кронікера, $\delta_{ik} = \begin{cases} 1 \text{ при } i = k, \\ 0 \text{ при } i \neq k \end{cases}$,

$\sigma_0 = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}$, де $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$, – головні

напруження в координатах, x_1, x_2, x_3 .

Доречно буде розглянути процес волочиння в одновимірній постановці, коли рівняння руху набуває найпростішого вигляду:

$$\rho \left(\frac{\partial v_1}{\partial t} + v_1 \frac{\partial v_1}{\partial x_1} \right) = \frac{\partial \sigma_0}{\partial x_1} + \frac{4}{3} \frac{\partial}{\partial x_1} \left(\frac{T(v_1)}{H(v_1)} \frac{\partial v_1}{\partial x_1} \right), \quad (5)$$

де x_1, v_1 – просторова координата і проекція швидкості по осі.

Для ідеально пластичного матеріалу при відсутності конвекції це рівняння записується таким чином:

$$\rho \frac{\partial v_1}{\partial t} = \frac{\partial \sigma_1}{\partial x_1}, \quad (6)$$

Враховуючи те, що деформації малі, тобто

$$\frac{\partial l}{\partial x_1} \ll 1, \text{ то } \frac{\partial v_1}{\partial t} = \frac{\partial^2 l}{\partial t^2}.$$

Оскільки

$$\frac{\partial \sigma_1}{\partial x_1} = \frac{\partial \sigma_1}{\partial \varepsilon_1} \frac{\partial \varepsilon_1}{\partial x_1} = \frac{\partial \sigma_1}{\partial \varepsilon_1} \frac{\partial}{\partial x_1} \left(\frac{\partial l}{\partial x_1} \right) = \frac{\partial \sigma_{11}}{\partial \varepsilon_1} \frac{\partial^2 l}{\partial x_1^2}, \quad (7)$$

то ми отримуємо хвильове рівняння:

$$\frac{\partial^2 l}{\partial t^2} = \frac{1}{\rho^2} \frac{d\sigma_1}{d\varepsilon_1} \frac{\partial^2 l}{\partial x_1^2}, \quad (8)$$

де ρ – щільність матеріалу деформуємої системи.

Оскільки в рівнянні (8) $\frac{d\sigma_1}{d\varepsilon_1} = \text{var}$, виникає

необхідність використання спеціальних методів його рішення та аналізу отриманих результатів. Якщо прийняти допущення про справедливості гіпотез «плоских діаметральних перерізів», рішення можна представити в наступному вигляді. Елементарна енергія, необхідна для зміни швидкості деякої незкінченно малої маси матеріалу dm в осередку деформації, дорівнює імпульсу, прикладеному до даної маси сили:

$$d\Phi \cdot dt = dV_1 \cdot dm \quad (9)$$

де Φ – інерційне напруження, прикладене до даної маси;

t – час;

V_1 – проекція швидкості руху елемента заготовки на вісь x_1 ;

dm – безмежно мала маса матеріалу заготовки в осередку деформації.

Враховуючи переважно вісьовий напрям деформації матеріалу, замінюємо диференціальні швидкості, час і маси їх значеннями:

$$dm = \rho F dl, \quad (10)$$

$$dV_1 = V_0 \frac{dl}{l}, \quad (11)$$

$$dt = \frac{dl}{V_0}, \quad (12)$$

де V_0 – швидкість волочиння;

l – довжина осередку деформації.

Після перетворень отримуємо:

$$d\Phi = \rho V_0^2 F \frac{dl}{l}, \quad (13)$$

Рівняння (1) приймає вигляд:

$$d(P \pm \Phi) = \sigma_1 dF + F d\sigma_1 = 0, \quad (14)$$

при цьому

$$d\sigma_1 = \frac{\partial \sigma_1}{\partial \varepsilon_1} d\varepsilon + \frac{\partial \sigma_1}{\partial \dot{\varepsilon}_1} d\dot{\varepsilon}_1 + \frac{\partial \sigma_1}{\partial t} dt, \quad (15)$$

де $\dot{\varepsilon}_1$ – швидкість деформаційного подовження прутка.

Шукана умова набуває вигляду:

$$\frac{1}{\sigma_1} \left(\frac{\partial \sigma_1}{\partial \varepsilon} d\varepsilon + \frac{\partial \sigma_1}{\partial \dot{\varepsilon}} d\dot{\varepsilon} + \frac{\partial \sigma_1}{\partial t} dt \right) = \frac{d\varepsilon}{1 + \varepsilon}. \quad (16)$$

При прийнятому законі деформаційно-швидкісного зміцнення отримуємо:

$$n\varepsilon^{n-1}\varepsilon^m d\varepsilon + m\varepsilon^n \varepsilon^{m-1} d\dot{\varepsilon} + \frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon^n \dot{\varepsilon}^m) dt = \frac{\varepsilon^n \dot{\varepsilon}^m d\varepsilon}{1 + \varepsilon}. \quad (17)$$

Для матеріалу з малим швидкісним зміцненням $m \approx 0$ приходимо до диференціального рівняння наступного виду:

$$n d\varepsilon + n d\dot{\varepsilon} = \frac{\varepsilon d\varepsilon}{1 + \varepsilon}. \quad (18)$$

Зменшення товщини перерізу на зразку з'являється при наступному співвідношенні деформації і її швидкості:

$$\dot{\varepsilon}(t) = \dot{\varepsilon}(0) [\varepsilon(n-1) - \ln(1 + \varepsilon)]. \quad (19)$$

За аналогією для в'язких матеріалів з малим деформаційним зміцненням $n = 0$ отримуємо:

$$\dot{\varepsilon}(t) = \dot{\varepsilon}(0) (1 + \varepsilon)^{\frac{1}{2m}}. \quad (20)$$

Таким чином, при отриманих співвідношеннях кінематичних параметрів волочіння, забезпечуються умови сталого формоутворення.

V. Двостороннє зтиснення елемента заготовки на виході з осередку деформації. Калібруючий пояс волоки перешкоджає радіальній текучості матеріалу заготовки, що аналогічно дії зовнішнього тертя при осіданні циліндричних заготовок. З'єднання елемента заготовки на виході з волоки може бути забезпечене шляхом застосування врізної опори. Остання може бути виконана у вигляді кільцевої ємкості 3 з деформуючими стінками, заповненими рідиною під тиском рис.1 [1].

Правильніше еластичну опору виконати у вигляді самокеруючого поршня. Застосовуючи підходи до конструювання, які викладені в роботах [14, 15] проектуємо новий вібродеформуючий вузол рис. 2.

Відповідно до принципу Сен-Венана для радіальних зусиль затухає по мірі віддалення від контактних поверхонь. Тому при двосторонньому з'єднанні заготовки в середині довжини стискаємого

елемента заготовки виникає схема лінійного напруженого стану.

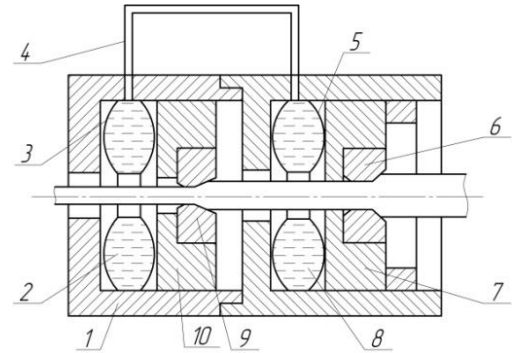


Рис. 1 – Автоколивальний гидромеханічний пристрій для волочіння металу: 1 – корпус; 2, 8 – рідина; 3, 5 – кільцеві ємкості з ультразвуковими стінками; 4 – з'єднувальний канал; 6, 9 – волокни; 7, 10 – волокотримачі

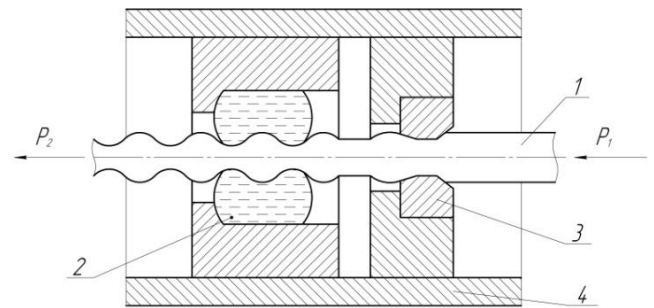


Рис. 2 – Віброволочіння з циклічною опорою при використанні як пружної опори поршня, що самовивертається: 1 – заготовка; 2 – поршень, що самовивертається; 3 – волока; 4 – волокотримач

Висновки:

1. Ефект періодичної зміни діаметра прутка або проволочки при віброволочінні пов'язаний з фрикційними коливаннями; втратою стійкості при деформації як при виникненні напружень текучості в матеріалі прутка, так і при утворенні «шийки», а також як результат дії сил інерції.

2. Отримані залежності дозволяють визначити умови нестійкого деформування і стабілізувати процес отримання періодичного профілю шляхом управління параметрами процесу віброволочіння.

Список літератури

1. Клименко В.М., Шаповал В.Н. Вибрационная обработка металлов давлением. – Киев: Техника, 1977. – 128 с.
2. Shapoval A.N. Development of The Unit For Multi-stage Vibration Drawing of Metal Product / Shapoval A.N., Shapoval A.A. // Tsvetnye Metally, 2002, Issue 4, P. 77–82.
3. Gorbatyuk, S.M., Shapoval, A.A., Mos'pan, D.V., & Dragobetskii V.V. Production of Periodic Bars by Vibrational Drawing // Steel in Translation, 2016, Vol. 46, No. 7, pp. 474–478. © Allerton Press, Inc. DOI: 10.3103/S096709121607007X
4. Straightening of Sheet with Correction of Waviness / A.V. Barabash, E. Yu. Gavril'chenko, E. P. Gribkov, O. E. Markov // Steel in Translation. – 2014. – Vol. 44. – No. 1. – PP. 916–920. DOI: 10.3103/S096709121412002X

5. Gogaev, K.A., Kalutskii, G.Ya., Voropaev, V.S. Asymmetric rolling of metal powders. I. Compactability of metal powders in asymmetric rolling // Powder Metallurgy and Metal Ceramics, March 2009, Volume 48, Issue 3, PP. 152–156
6. Драгобецкий В.В. Опытнo-промышленный стан для бесконтейнерного вибрационного прессования вольфрамовых и молибденовых прутков / В.В. Драгобецкий, А.А. Шаповал, Д.В. Савелов, А.Г. Маркевич // Обработка металлов давлением. Сборник научных трудов. – Краматорск: ДГМА, 2012. – Вып. № 4 (33) – 2012. – С. 257–261.
7. Mazur V.L. Opportunities and prospects of the ukrainian metallurgy development // Metallurgical and Mining Industry 2015. № 11. – PP. 212–217.
8. Gorbatyuk, S.M.; Shapoval, A.N.; Rybakov, V.S.; et al. Nondestructive method of checking the quality of a semifinished product for tungsten wire // METALLURGIST Volume: 43 Issue: 11-12 Pages: 561–565 DOI: 10.1007/BF02463583 Published: NOV-DEC 1999
9. Мальишев В.П., Абдрахманов Б.Т., Нурмагамбетова А.М. Плавокост и пластичность металлов // М.: Научный мир, 2004. – 148 с.
10. Dragobetskii V.V., Shapoval A.A., Mospan D.V., Trotsko O.V., Lotous V.V. Excavator Bucket Teeth Strengthening Using a Plastic Explosive Deformation // Metallurgical and Mining Industry, 2015, No. 4, pp. 363–368.
11. Kukhar V.V., Vasylevskiy O.V. Experimental research of distribution of strains and stresses in work-piece at different modes of stretch-forging with rotation in combined dies // Metallurgical and Mining Industry. – 2014. – № 3. – pp. 71–78.
12. Ogorodnikov V.A., Savchinskij I.G., Nakhajchuk O.V. Stressed-strained state during forming the internal slot section by mandrel reduction // Tyazheloe Mashinostroenie – 2004. – № 12. – pp. 31–33.
13. V. Sikulskiy, V. Kashcheyeva, Yu. Romanenkov, A. Shapoval Study of the process of shape-formation of ribbed double-curvature panels by local deforming // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – Vol. 4, Issue 1 (88). – P. 43–49. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.108190
14. Хорольский В.Л. Определение напряжений в процессе снятия фаски резкой в штампах на листовых заготовках перед сваркой / В.Л. Хорольский // Вісник Національного технічного університету «ХПІ» збірник наукових праць. Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», – 2015. – № 47 (1166). – С. 66–74.
15. Eron'ko S.P. Efficient slide-gate systems Metallurgist March 2003, Volume 47, Issue 3, PP. 158–162

Bibliography (transliterated)

1. Klymenko V. M., Shapoval V. N. (1977). Vybratsyonnaya obrabotka metallov davleniem. Kyev: Tekhnika, 128 p
2. Shapoval A. N. (2002). Development of The Unit For Multi-stage Vibration Drawing of Metal Product. Tsvetnye Metally, 4, 77–82.
3. Gorbatyuk, S.M., Shapoval, A.A., Mospan, D.V., & Dragobetskii V.V. Production of Periodic Bars by Vibrational Drawing // Steel in Translation, 2016, Vol. 46, No. 7, pp. 474–478. © Allerton Press, Inc. DOI: 10.3103/S096709121607007X
4. V. Barabash, E. Yu. Gavrilchenko, E. P. Gribkov, O. E. Markov. (2014). Straightening of Sheet with Correction of Waviness. Steel in Translation, 1, pp. 916–920. doi: 10.3103/S096709121412002X
5. Gogaev, K. A., Kalutskii, G. Ya., Voropaev, V. S. (2009). Asymmetric rolling of metal powders. I. Compactability of metal powders in asymmetric rolling. Powder Metallurgy and Metal Ceramics, 48, pp. 152–156.
6. Dragobetskii V.V. Opytno-promyshlennyy stan dlja beskontejnernogo vibracionnogo pressovaniya vol'framovyh i molibdenovyh prutkov / V.V. Dragobetskij, A.A. Shapoval, D.V. Savelov, A.G. Markevich // Obработка металлов давлением. Sbornik nauchnyh trudov. – Kramatorsk: DGMA, 2012. – Vyp. No. 4 (33) – 2012. – pp. 257–261.
7. Mazur V. L. (2015). Opportunities and prospects of the ukrainian metallurgy development. Metallurgical and Mining Industry, 11, pp. 212–217.
8. Gorbatyuk, S. M, Shapoval, A. N; Rybakov, V. S; et al. (1999). Nondestructive method of checking the quality of a semifinished product for tungsten wire. METALLURGIST, 43, pp. 561–565. doi: 10.1007/BF02463583.
9. Malishev V. P., Abdrakhmanov B. T., Nurmahambetova A. M. (2004). Plavkost' y plastychnost' metallov. Moscow: Nauchniy myr, 148 p.
10. Dragobetskii V. V., Shapoval A. A., Mospan D. V., Trotsko O. V., Lotous V. V. (2015). Excavator Bucket Teeth Strengthening Using a Plastic Explosive Deformation. Metallurgical and Mining Industry, 4, pp. 363–368.
11. Kukhar V. V., Vasylevskiy O. V. (2014). Experimental research of distribution of strains and stresses in work-piece at different modes of stretch-forging with rotation in combined dies. Metallurgical and Mining Industry, 3, pp. 71–78.
12. Ogorodnikov V. A., Savchinskij I. G., Nakhajchuk O. V. (2004). Stressed-strained state during forming the internal slot section by mandrel reduction. Tyazheloe Mashinostroenie, 12, pp. 31–33.
13. V. Sikulskiy, V. Kashcheyeva, Yu. Romanenkov, A. Shapoval Study of the process of shape-formation of ribbed double-curvature panels by local deforming // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – Vol. 4, Issue 1 (88). – pp. 43–49. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.108190
14. Horol'skij V.L. Opredelenie napryazhenij v processe snjatija faski rezkoj v shtampah na listovyh zagotovkah pred svarkoj / V.L. Horol'skij // Visnik Nacional'nogo tehnicnogo universitetu «HPI» zbirnik naukovih prac'. Serija: Innovacijni tehnologii ta obladnannja obrobki materialiv u mashinobuduvanni ta metalurgii. – Harkiv: NTU «HPI», – 2015. – No. 47 (1166). – pp. 66–74.
15. Eron'ko S. P. (2003). Efficient slide-gate systems Metallurgist March, 3, pp. 158–162.

Надійшло (received) 01.11.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Розробка технології виробництва заготовок періодичного профілю вібраційним волочінням / О.О. Шаповал // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів машинобудуванні та металургії. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – №35 (1257). – С. 84–89. – Бібліогр.: 15 назв. – ISSN 2519-2671

Разработка технологии производства заготовок периодических профилей вибрационным волочением / А.А. Шаповал // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів машинобудуванні та металургії. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 35 (1257). – С. 84–89. – Бібліогр.: 15 назв. – ISSN 2519-2671

Development of technology of manufacturing of periodic profile bars by vibratory drawing / A.A. Shapoval // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Innovative technologies and equipment of materials processing in engineering and metallurgy. – Kh.: NTU "KhPI", 2017. – No. 35 (1257). – P. 84–89. – Bibliogr.: 15. – ISSN 2519-2671

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Шаповал Олександр Олександрович – кандидат технічних наук, доцент, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, доцент кафедри технології машинобудування; тел.: (05366) 3-11-00; e-mail: shapoval_a@kdu.edu.ua

Шаповал Александр Александрович – кандидат технических наук, доцент, Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского; доцент кафедры технологии машиностроения; тел.: (05366) 3-11-00; e-mail: shapoval_a@kdu.edu.ua

Shapoval Alexander A. – Candidate of Technical Sciences, Associate professor, Kremenchuk Mykhailo Ostohradskyi National University, Associate professor of department of technology of engineer; tel.: (05366) 3-11-00; e-mail: shapoval_a@kdu.edu.ua

ЗМІСТ

Автономова Л.В., Грозенок Е.Д., Степук А.В., Погорелов С.Ю. Численное определение контактных усилий при горячей раскатке заготовки подшипникового кольца.....	5
Загорянский О.В. Формирование свойств листовой двухслойной коррозионно-стойкой стали, полученной плакированием прокаткой.....	10
Калюжний В.Л., Потятиник А.М., Куліков І.П., Унгурян С.І. Прогнозування механічних властивостей здеформованого металу при холодному прямому видавлюванні стержневих виробів по схемі «заготовка за заготовкою».....	14
Клемешов Е.С., Чухлеб В.Л. Исследование формоизменения металла в процессековки шатунной шейки коленчатого вала.....	21
Косілов М.С., Марков О.Є., Герасименко О.В., Шевцов С.О. Модельовання деформованого стану східчастих пустотілих поковок в процесі розкочування.....	25
Краев М.В., Краева В.С. Раздача трубчатых заготовок в постоянном магнитном поле.....	30
Левченко В.М., Коворотний Т.Л., Кузьменко В.І., Даниленко В.Я. Виготовлення заготовок для корпусів конекторів холодним видавлюванням.....	34
Лимаренко В.В., Хавіна І.П. Синтез структури технологічних процесів обробки металів різанням.....	39
Плеснецов С.Ю. Високоєфективний контроль труб електромагнітно-акустичними перетворювачами.....	44
Плеснецов Ю.А., Христинченко А.Н., Христинченко Е.Н. Разработка и исследование технологии производства профилей переменного сечения.....	49
Сердюк А.И., Кухарь В.В., Присяжный А.Г. Анализ базовых аддитивных технологий с учетом их основных технологических возможностей.....	60
Тришевський О.І., Салтавець М.В. Методика спрощеного обчислення теплового стану металу при прокатці тонкого листа.....	63
Фролов Є.А., Мороз М.М., Саленко Ю.С., Ясько С.Г. Дослідження впливу зусилля притискання заготовки на якість процесу витягування високошвидкісним штампуванням.....	68
Хавин В.Л., Лавриненко И.С., Шергин С.Ю. Моделирование усилий при сверлении костного материала.....	73
Чубенко В.А., Хинокская А.А. Влияние термомеханических режимов прокатывания на предел текучести стали.....	78
Шаповал О.О. Розробка технології виробництва заготовок періодичного профілю вібраційним волочінням.....	84

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

**ВІСНИК
НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО
УНІВЕРСИТЕТУ «ХП»**

Збірник наукових праць

**Серія
«Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів
у машинобудуванні та металургії»**

Випуск 35 (1257) 2017

Науковий редактор: д-р техн. наук проф. А.П. Марченко

Технічні редактори: Т.Л. Коворотний, О.С. Курандо

Відповідальний за випуск канд. техн. наук Г.Б. Обухова

АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ: 61002, м. Харків, вул.. Фрунзе, 21, НТУ «ХП». каф. обробки металів тиском, тел. (057) 707-60-40, 707-69-16, e-mail: omd.conf@gmail.com, kurando@mail.ru

Обл. вид. № 29-17

Підп. до друку 20.11.2017 р. Формат 60х84 1/16. Папір офсетний. RISO-друк. Гарнітура Таймс. Ум.друк.арк. 8,42. Обл.-вид. арк. 8.6.

Наклад 300 прим. Зам. No 17. Ціна договірна.

Видавничий центр НТУ «ХП».

Свідоцтво про державну реєстрацію ДК No 116 от 10.07.2000 р.

61002, Харків, вул. Кирпичова, 2

Видавництво та друк ФО-П Шейніна О.В.

61052, Україна, м. Харків, вул. Слов'янська, 3

Тел. 057 759-48-79

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до Державного реєстру видавців, виготівників і розповсюджувачів видавничої продукції

ДК No 2779 від 28.02.2007 р.