

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*

**№ 30 (1202) 2016**

Збірник наукових праць

Видання засновано у 1961 році

Харків  
НТУ «ХПІ» 2016

## **Вісник Національного технічного університету «ХПІ»**

Збірник наукових праць. Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2016. – № 30 (1202) – 89 с.

**Державне видання**

**Свідоцтво Держкомітету з інформаційної політики України**

**КВ № 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. Калюжний, д-р техн. наук, проф.; В. К. Лобанов, 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 04 листопада 2016 р.

© Національний технічний університет «ХПІ», 2016

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 30 (1202) 2016**

Collected Works

The publication was founded in 1961

Kharkiv  
NTU "KhPI" 2016

Collected Works. Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2016. – No 30 (1202) – 89 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. Dmytryenko, 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 November 04, 2016



УДК 621.7

І. С. АЛІЄВ, В. Л. КАЛЮЖНЫЙ

**ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ДВОХПЕРЕХІДНОГО ШТАМПУВАННЯ  
ВИСОКИХ КОНУСНИХ ВИРОБІВ З ЛИСТОВОЇ ЗАГОТОВКИ ІЗ ПЛАСТИЧНОЇ МІДІ**

Методом скінченних елементів проведено визначення параметрів та кінцевих розмірів високих конусних виробів при формоутворенні із мідної листової заготовки за два переходи. На першому переході комбінованим витягуванням в конусній матриці спеціального профіля отриманий порожнистий напівфабрикат з конусною та циліндричною поверхнями. На другому переході обтиском циліндричної частини в конусній матриці формується кінцева форма виробу. Моделюванням витягування встановлені зусилля витягування, зусилля виймання пуансона із напівфабриката та зусилля виштовхування напівфабриката із матриці. Визначена форма деформуючого інструмента, яка забезпечила необхідний напружено-деформований стан та ресурс пластичності здеформованого металу на першому переході для виконання другого переходу без проміжного відпалу напівфабриката. З урахуванням накопичених деформацій проведений розрахунок обтиску напівфабриката. Встановлені кінцева форма і розміри виробу, зусилля обтиску, розподіл результуючих значень інтенсивності деформацій для прогнозування механічних властивостей здеформованого металу.

**Ключові слова:** порожнистий конусний виріб, метод скінченних елементів, комбіноване витягування, обтиск, зусилля витягування, зусилля обтиску, напружено-деформований стан металу.

Методом конечных элементов проведено определение параметров и конечных размеров высоких конусных изделий при формообразовании из медной листовой заготовки за два перехода. На первом переходе комбинированной вытяжкой в конусной матрице специального профиля получен полый полуфабрикат с конусной и цилиндрической поверхностями. На втором переходе обжимом цилиндрической части в конусной матрице достигается конечная форма изделия. Моделированием вытяжки установлены усилия вытяжки, вынимания пуансона из полуфабриката и выталкивания его из матрицы. Определена форма деформирующего инструмента, которая обеспечила необходимое напряженно деформированное состояние и ресурс пластичности сформированного металла на первом переходе для выполнения второго перехода без промежуточного отжига полуфабриката. С учетом накопленных деформаций проведен расчет обжима полуфабриката. Установлены конечная форма и размеры изделия, усилия обжима, распределение результирующих значений интенсивности деформаций для прогнозирования механических свойств сформированного металла.

**Ключевые слова:** полое конусное изделие, метод конечных элементов, комбинированная вытяжка, обжим, усилие вытяжки, усилие обжима, напряженно-деформированное состояние сформированного металла.

There are determined parameters and finite size high conical products received by the forming in two stages of plastic copper sheet workpiece by finite element method. In first stage received the hollow semi-finished product with conical and cylindrical surfaces by combined drawing in conical matrix of special profile. In second stage reached the final form of the product by reducing a cylindrical part in conical matrix. There are determined the drawing's forces, forces of removing the punch from the semi-finished product, and ejecting it from the matrix by modeling the drawing. There're identified the form of deforming die, that provided the necessary stress-strain state and the resource of plasticity in deformed metal in first stage for fulfillment the second stage without intermediate annealing of semi-finished product. Conducted calculation of reducing the semi-finished product with considering the accumulated strain. There're identified the final shape and sizes of product, reducing's forces, distribution of the resulting values of strain intensity for prediction of mechanical properties of the deformed metal.

**Keywords:** hollow conical product, finite element method, combined drawing, reducing, drawing's forces, reducing's forces, stress-strain state, final sizes of product.

**Вступ.** В залежності від співвідношення висоти конусної деталі ( $h$ ) до зовнішнього діаметра ( $d$ ) та величини кута твірної конуса ( $\alpha$ ) автор роботи [1] розподіляє такі вироби на три групи – низькі, середні та високі. Найбільшу складність у виготовленні штампуванням із листової заготовки методом витягування мають високі конусні деталі, для яких  $h/d = 0,8$  і  $\alpha = 10^\circ \div 30^\circ$ . Застосовують багатоперехідне витягування, яке включає 4–7 переходів [1–4]. Застосування операцій витягування порожнистого напівфабриката з подальшим обтиском дозволяє зменшити кількість переходів виготовлення конусних виробів [5]. Перевагами такого підходу є отримання виробів з практично однаковою товщиною стінки по висоті, тому що при витягуванні має місце потоншення стінки донної частині порожнистого напівфабриката, а при обтиску відбувається потовщення цієї частини. При цьому значно зрощується штампове оснащення та виключається

використання пресового обладнання подвійної дії. Однак в неведених джерелах відсутні дані по силових режимах формоутворення та кінцевих розмірах виробів, зокрема для високих конусних виробів із  $h/d \geq 0,8$  і  $\alpha = 10^\circ \div 30^\circ$ .

Для отримання порожнистого напівфабриката під подальший обтиск, що дозволить підвищити ступеня деформації при витягуванні за один перехід та збільшити його висоту, можна застосувати комбіноване витягування з притискачем в одноконусній матриці, ефективність якого приведена в роботі [6]. Додаткове збільшення ступеня деформації за один перехід та суттєве зменшення кількості переходів витягування забезпечує використання матриці спеціального профіля [7–11].

**Формоутворення конусних порожнистих виробів.** Формоутворення конусного виробу з використанням витягування із притискачем в одноконусній матриці спеціального профіля та

обтиску зображена на рис. 1. На рис. 1а показана схема витягування напівфабриката в одноконусній матриці. Ліворуч від вісі симетрії наведений вихідний стан перед витягуванням, а праворуч – після витягування. Вихідну листову заготовку 1 діаметром  $D_0$  і товщиною  $S_0$  встановлюють між матрицею 2 та притискачем 3. Зусилля деформування  $P_d$  прикладають за допомогою пуансона 4. В результаті витягування отримують напівфабрикат 5 із зовнішнім діаметром  $D_v$ , висотою  $H_v$  та кутом  $\alpha$  конусної частини. При цьому висота  $h_v$  та діаметр  $D_m$  циліндричної частини повинні бути такими, щоб забезпечити виконання подальшого обтиску за один перехід та отримання необхідної висоти конусного виробу. Для видалення напівфабриката із матриці 2 використовують виштовхувач 6. Форма деформуючої поверхні матриці утворена перетином торів з діаметром перерізу  $d_1$  та з кроком розташування  $t$  (рис. 1б). Дотична до поверхнь торів утворює кут  $\alpha$  з віссю симетрії матриці, який необхідний з креслення виробу. Крок  $t$  розташування торів повинен бути таким, щоб не було прогинання стінки заготовки між виступами деформуючої поверхні матриці. Такий профіль забезпечує суттєве зниження сил тертя між zdeформованою заготовкою і матрицею та зменшення величини розтягувальних напружень в стінці циліндричної частини. Отриманий напівфабрикат підлягає подальшому обтиску (рис. 1в). Напівфабрикат 1 встановлюють на

пуансон 2 до упору на виштовхувач 3. Зусилля деформування  $P_d$  прикладають за допомогою одночасного переміщення матриці 4 і штовхача 5. В результаті отримують конусний виріб 6 діаметром  $D_v$ , висотою  $H_w$  та кутами  $\alpha$  і  $\gamma$ , які можуть бути однакової або різної величини. Радіус  $R_w$  донної частини виробу при обтиску може утворюватися довільно або за допомогою виштовхувача 5.

**Мета роботи.** Метою роботи є встановлення параметрів комбінованого витягування напівфабриката в одноконусній матриці спеціального профіля, подальшого його обтиску та виявлення кінцевих розмірів високого конусного виробу.

**Постановка задачі для визначення параметрів штампування.** Встановлення параметрів проведене шляхом створення математичних моделей з використанням метода скінченних елементів (МСЕ) та проведенням чисельних експериментів із застосуванням програми DEFORM. Використана пружно-пластична модель ізотропного металу, що деформується. Деформуючий інструмент вважався абсолютно жорстким. Тертя на контактуючих поверхнях враховане по Кулону з коефіцієнтом тертя  $\mu = 0,08$ . Швидкість деформування складала 2 мм/сек. При моделюванні операції обтиску враховані накопичені деформації та вичерпаний ресурс пластичності zdeформованого металу, які отримані на першому переході витягування напівфабриката в одноконусній матриці спеціального профіля.

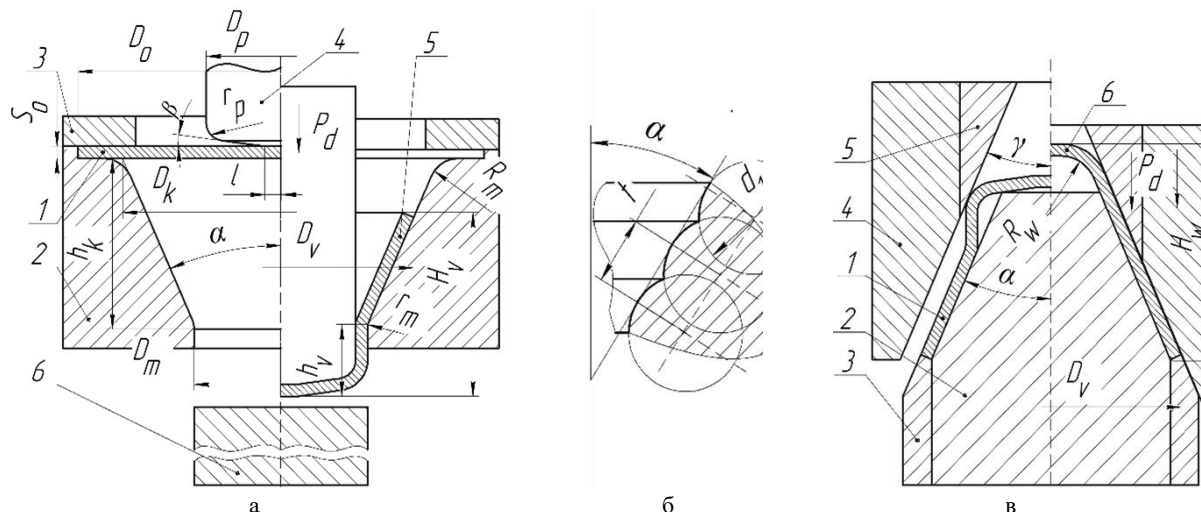


Рис. 1 – Формоутворення конусного виробу з використанням витягування із притискачем в одноконусній матриці спеціального профіля та подальшого обтиску: а – схема витягування в одноконусній матриці, б – профіль деформуючої поверхні матриці, в – схема обтиску напівфабриката з отриманням конусного виробу

Витягуванню підлягала листова заготовка діаметром  $D_0 = 128$  мм і товщиною  $S_0 = 3,5$  мм із

відпаленої міді М2 з умовною межею текучості  $\sigma_{0,2} = 100$  МПа. Розміри пуансона (див. рис. 1а):

$D_p = 46,8$  мм,  $r_p = 15$  мм,  $\beta = 15^\circ$ ,  $l = 5$  мм. Наведені розміри пуансона встановлені розрахунком і забезпечували необхідну форму напівфабриката з мінімальним потоншенням стінки на радіусі заокруглення  $r_p$  та в донній частині. Кут конусної поверхні матриці  $\alpha$  визначався формою конусного виробу та складав  $\alpha = 21^\circ$ . Інші розміри матриці:  $D_m = 90$  мм,  $D_k = 198$  мм,  $R_m = 16$  мм,  $r_m = 30$  мм,  $h_k = 133$  мм,  $d_m = 100$  мм.

Моделюванням встановлено, що деформуюча поверхня матриці, яка утворена перетином торів із  $d_1 = 6$  мм з кроком розташуванням  $t = 6$  мм забезпечує формоутворення напівфабриката при витягуванні без прогинання стінок zdeформованої заготовки між виступами деформуючої поверхні.

#### Послідовність формоутворення конусних виробів дво перехідним штампуванням.

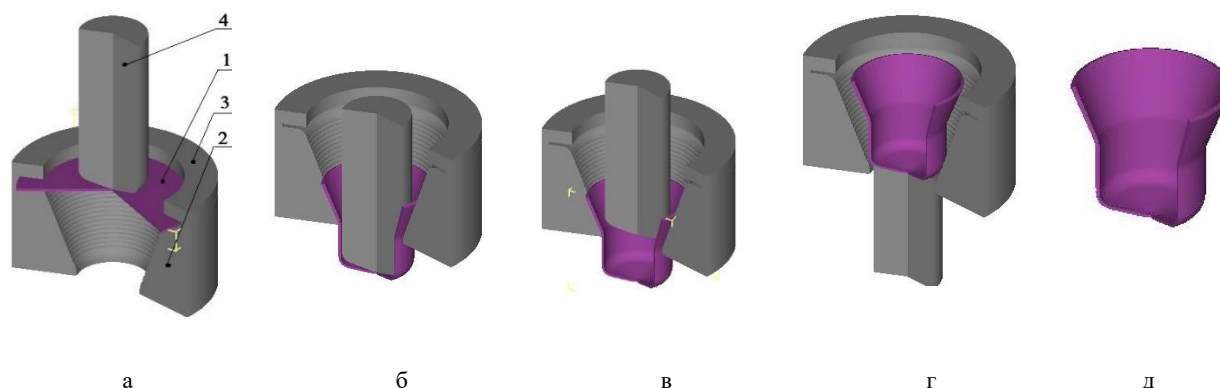


Рис. 2 – Послідовність формоутворення напівфабриката витягуванням в одноконусній матриці спеціального профіля: а – вихідне положення при витягуванні, положення в кінці витягування, в – положення після виймання пуансона із zdeформованої заготовки, г – положення після виштовхування напівфабриката із матриці, д – загальний вигляд напівфабрикату

**Силкові режими витягування.** Розрахунковим шляхом встановлені силкові режими при формоутворенні витягуванням: зусилля витягування, зусилля виймання пуансона із напівфабриката та зусилля видалення його із матриці (рис. 3). На рис. 3а зображена залежність зусилля витягування, яке отримане на пуансоні від його переміщення. Зусилля постійно зростає, невелике зменшення спостерігається на стадії виходу фланця із притискача. На кінцевій стадії витягування зусилля досягає величини 285 кН. З наведеного графіка можна визначити роботу деформації. Для проектування штампового оснащення необхідно знати величину зусилля на

Моделюванням за допомогою МСЕ виявлені всі етапи отримання напівфабриката. На рис. 2 зображена послідовність формоутворення напівфабриката витягуванням в одноконусній матриці спеціального профіля. Положення штампуну перед витягуванням показане на рис. 2а. Вихідна заготовка  $l$  встановлена між матрицею 2 і притискачем 3. Зусилля прикладається за допомогою пуансона 4. На рис. 2б наведено положення в кінці витягування. Витягування завершували при переміщенні пуансона 205 мм, при якому не починається інтенсивне потоншення стінки zdeформованої заготовки на радіусі заокруглення пуансона. Розрахунок показав, що при зворотному ході пуансона напівфабрикат залишається в матриці (рис. 2в). Положення після виштовхування напівфабриката зображене на рис. 2г. Загальний вигляд напівфабриката наведений на рис. 2д.

притискачі при витягуванні. Найбільше значення такого зусилля (87 кН) виникає при переміщенні пуансона 67 мм (рис. 3б). Використання пружно-пластичної моделі металу дозволило виявити зусилля виймання пуансона при зворотному ході пуансона та зусилля видалення напівфабриката із матриці. Залежність зусилля виймання від переміщення пуансона приведена на рис. 3в. Максимальне значення зусилля виймання виникає на початку зворотного ходу і досягає 30 кН з невеликим зменшенням до величини 27 кН на кінцевій стадії виймання. Зусилля виймання напівфабриката із матриці складає 3 кН.



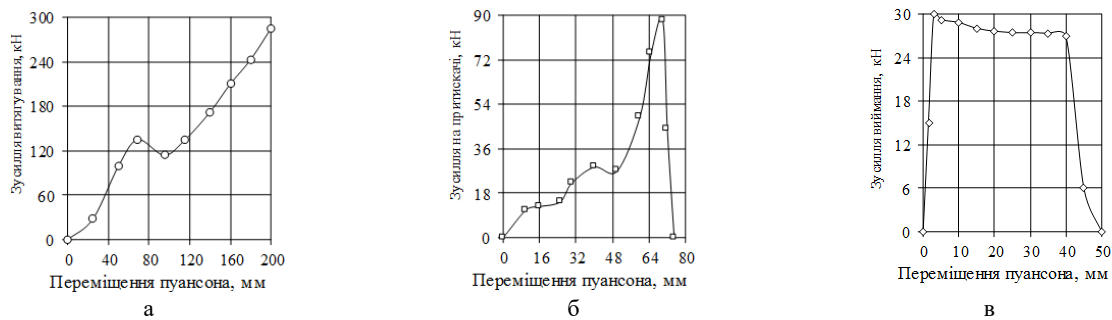


Рис. 3 – Силкові режими витягування: а – залежність зусилля витягування від переміщення пуансона, б – залежність зусилля на притискачі від переміщення пуансона, в – залежність зусилля виймання пуансона із напівфабриката при зворотному ході

**Напружено-деформований стан та температура при витягуванні.** Для виявлення можливості подальшого обтиску напівфабриката, який отриманий витягуванням, без виконання проміжного відпалу встановлений напружено-деформований стан та ступінь використання ресурсу пластичності zdeформованого металу. На рис. 4 зображені форма і розміри половини

напівфабриката, розподіли осьових  $\sigma_z$  і тангенціальних  $\sigma_\theta$  напружень, інтенсивності деформацій  $\epsilon_i$  в ньому, вичерпаного ресурсу пластичності  $\psi$  та температури  $T$  у zdeформованому металі. Тут і в подальшому тонкими лініями зображений деформуючий інструмент.

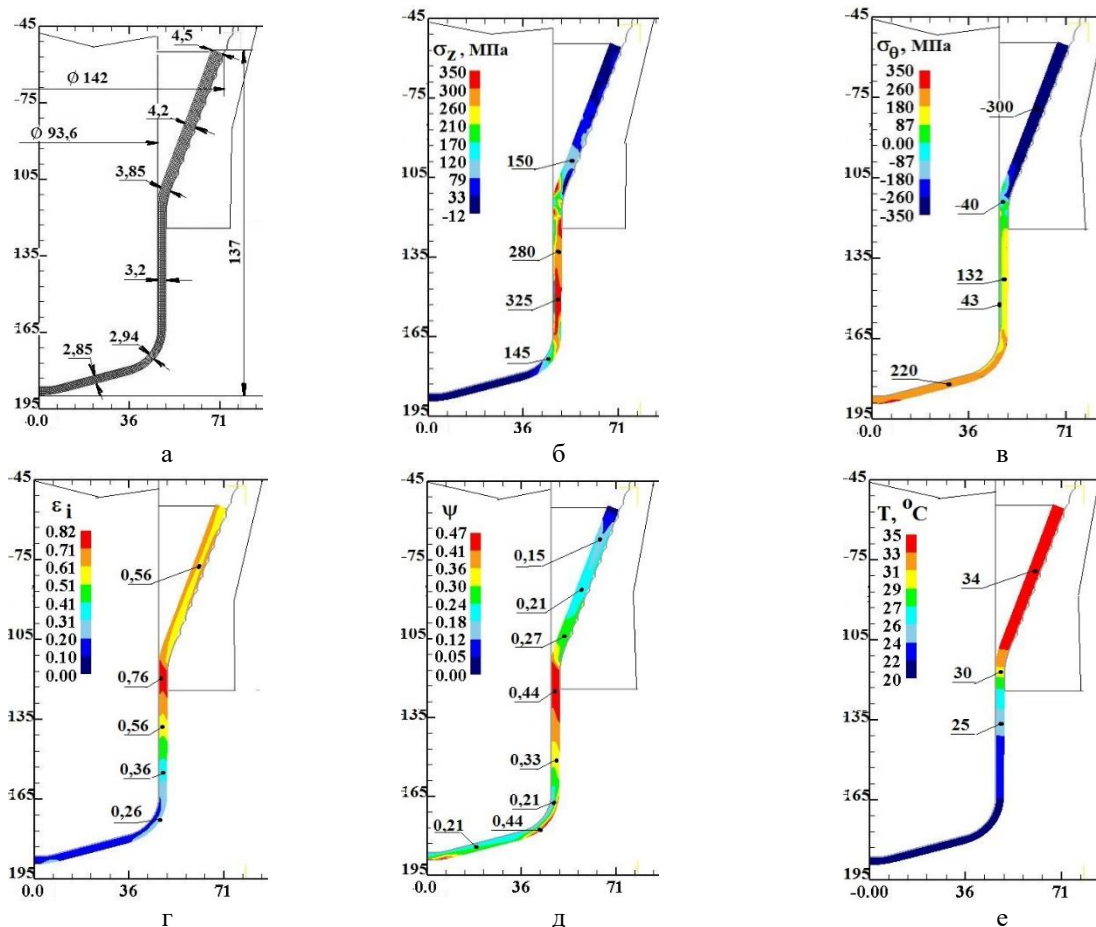


Рис. 4 – Форма і розміри половини напівфабриката та розподіли у zdeформованому металі осьових  $\sigma_z$  і тангенціальних  $\sigma_\theta$  напружень, інтенсивності деформацій  $\epsilon_i$ , вичерпаного ресурсу пластичності  $\psi$ , температури  $T$ : а – форма і розміри, б – розподіл  $\sigma_z$ , в – розподіл  $\sigma_\theta$ , г – розподіл  $\epsilon_i$ , д – розподіл  $\psi$ , е – розподіл  $T$ . Розміри по всіх координат в міліметрах



При витягуванні відбувається потовщення стінки конусної частини напівфабриката (рис. 4а). На торці напівфабриката діаметром 142 мм товщина складає 4,5 мм, посередині цієї частини отримано 4,2 мм, а в місці переходу конусної частини в циліндричну – 3,85 мм. Стінка циліндричної частини напівфабриката має постійну товщину 3,2 мм, яка відповідає величині односторонньому зазору між пуансоном і матрицею. У донній частині напівфабриката стінка потоншується з вихідної товщини 3,5 мм до 2,94 мм на радіусі заокруглення пуансона та до 2,85 мм на конусній поверхні пуансона. На рис. 4б зображений розподіл осьових напружень  $\sigma_z$  у напівфабрикаті, які є основним фактором, що визначає можливість формоутворення без руйнування. Всі напруження  $\sigma_z$  розтягувальні. Найбільше значення 325 МПа виникає у стінці циліндричної частини напівфабриката. Зона з такими напруження займає не всю товщину стінки.

Ще одне небезпечне місце zdeформованої заготовки, що виникає при витягуванні – це на радіусі заокруглення пуансона, в якому отримано  $\sigma_z = 145$  МПа. При витягуванні в одноконусній матриці тангенціальні напруження  $\sigma_\theta$  також суттєво впливають на формоутворення по конусній поверхні матриці і можуть привести до складкоутворення у zdeформованій заготовці. Розподіл напружень  $\sigma_\theta$  показаний на рис. 4в. У конусній частині напівфабриката ці напруження стискаючі і досягають значення  $\sigma_\theta = -300$  МПа. При цьому складкоутворення не спостерігається. Пропрацювання структури металу холодною пластичною деформацією можна оцінити по розподілу інтенсивності деформацій  $\varepsilon_i$  у напівфабрикаті (рис. 4г). По середині конусної частини отримано  $\varepsilon_i = 0,56$ . У стінці, яка знаходиться в зазорі між калібруючим пояском матриці і пуансоном, досягається максимальне значення  $\varepsilon_i = 0,76$  завдяки потоншенню стінки. Далі величина інтенсивності деформацій зменшується по довжині циліндричної частини в напрямку донної частини напівфабриката.

Виявлений напружено-деформований стан дозволив встановити ступінь використання ресурсу пластичності  $\psi$  у zdeформованому металі, розподіл якого приведений на рис. 4д. Найбільші величини вичерпаного ресурсу у межах  $\psi = 0,44 \div 0,47$  отримані в стінках напівфабриката в зазорі між калібруючим пояском матриці і пуансоном та на радіусі заокруглення пуансона. При даних розмірах заготовки і zdeформуючого інструмента та стадії витягування ресурс пластичності вичерпується на половину. При комбінованому витягуванні в матриці спеціального профіля змінюється температура zdeформованого металу. Розподіл температури зображений на рис. 4е. У конусній частині напівфабриката температура досягає  $35^\circ \text{C}$ . Виявлення температури дозволяє уточнити вимоги для змащення для витягування.

**Послідовність формоутворення конусного в виробу обтиском.** Вище було відмічено, що при розрахунку обтиску (див. рис. 1в) враховані накопичені деформації та вичерпаний ресурс пластичності у zdeформованому металі напівфабриката після витягування. Розглянуте моделювання безпосередньо процесу обтиску, зворотного переміщення матриці після обтиску та знімання отриманого виробу із пуансона за допомогою виштовхача.

На рис. 5 зображена послідовність формоутворення конусного виробу обтиском в конусній матриці. Положення перед початком обтиску приведені на рис. 5а. Напівфабрикат 1 встановлюють конусною частиною на пуансон 2 та торцем спирається на виштовхувач 3. Здеформування виконують за допомогою одночасного переміщення матриці 4 із штовхачем 5.

Положення в кінці обтиску при переміщенні матриці 4 із штовхачем 5 на 50 мм показані на рис. 5б. При зворотному переміщенні матриці та штовхача отриманий виріб залишається на пуансоні 2 (рис. 5в). На рис. 5г наведено положення після знімання виробу із пуансона 2 за допомогою виштовхувача 3. Отриманий конусний виріб зображений на рис. 5д.

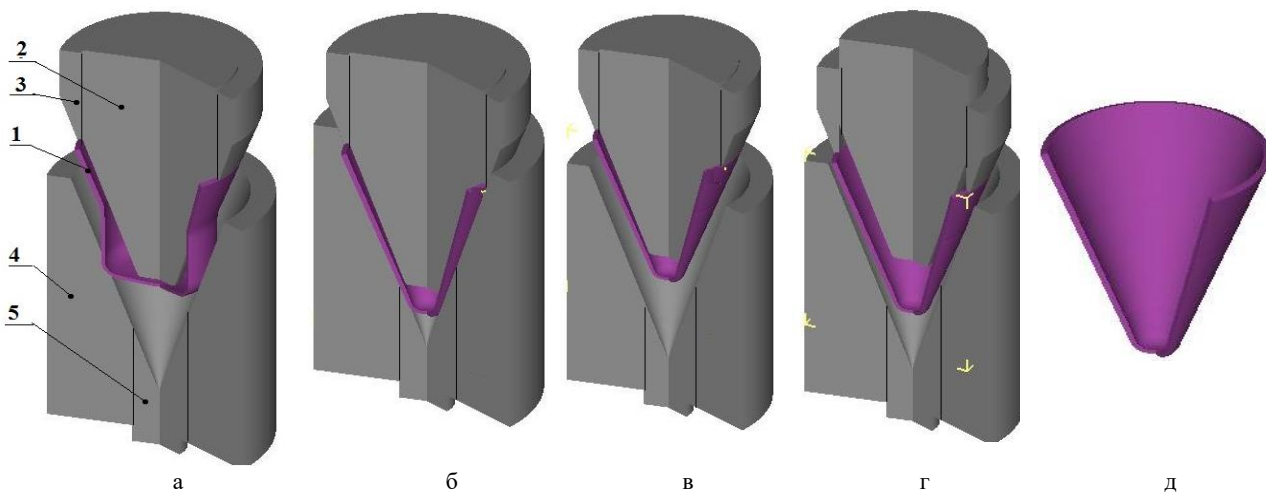


Рис. 5 – Послідовність формоутворення конусного виробу обтиском в конусній матриці: а – вихідне положення при обтиску, положення в кінці обтиску, в – положення після зворотного переміщення матриці із штовхачем, г – положення після зняття виробу із пуансона, д – загальний вигляд виробу

**Силевий режим обтиску, напружено-деформований стан здеформованої заготовки.** На рис. 6 приведена залежність зусилля обтиску від переміщення матриці із штовхачем. Зусилля постійно зростає і досягає максимального значення 546 кН в кінці обтиску при переміщенні 54 мм. Форма та розміри половини конусного виробу зображені на рис. 7. По довжині виробу стінка має різну товщину. Найбільше значення товщини отримано на торці з подальшим зменшенням до

донної частини. Висота виробу складає 157 мм, що на 20 мм більше в порівнянні з висотою с напівфабриката. При необхідності отримання постійної товщини стінки по висоті напівфабриката можна використати операцію калібрування або ротаційного витягування. На рис. 8 наведений розподіл результуючих значень інтенсивності деформацій  $\varepsilon_i$  за два переходи штампування.

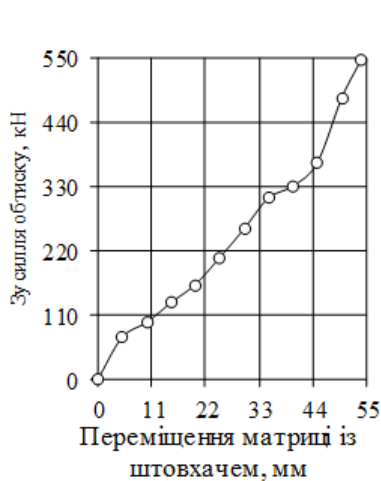


Рис. 6 – Залежність зусилля обтиску від переміщення матриці із штовхачем

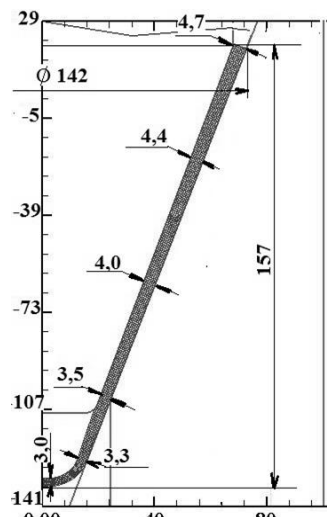


Рис. 7 – Форма і розміри в міліметрах половини конусного виробу

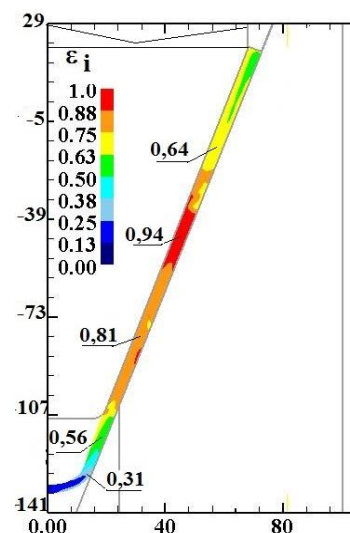


Рис. 8 – Розподіл результуючих значень інтенсивності деформацій  $\varepsilon_i$

У верхній частині виробу отримано  $\varepsilon_i = 0,5 \div 0,75$ . Найбільше пропрацювання структури металу холодною пластичною деформацією має місце в середній частині, в якій інтенсивність деформацій знаходиться у межах  $\varepsilon_i = 0,81 \div 0,94$ . Далі іде зменшення величини  $\varepsilon_i$  до

значення  $\varepsilon_i = 0,31$  в місці переходу конусної частини виробу в радіус заокруглення. По даному розподілу та з використанням діаграми істинних напружень для міді М2 можна прогнозувати механічні властивості у здеформованому металі по довжині конусного виробу.

**Висновки:**

1. З використанням методу скінченних елементів встановлені параметри двохперехідного штампування високих конусних порожнистих виробів з використанням операції витягування з притискачем в конусній матриці спеціального профіля та подальшого обтиску.

2. Для першого переходу витягування виявлені зусилля на пуансоні та притискачі та зусилля виймання пуансона із напівфабриката. Визначені кінцева форма і розміри напівфабриката, напружено-деформований стан, ступінь використання ресурсу пластичності та температура деформованого металу. Вичерпаний ресурс пластичності дозволяє виконати другий перехід штампування без проміжного відпалу напівфабриката.

3. Для другого переходу обтиску в конусній матриці встановлене зусилля обтиску, визначені кінцеві форма та розміри виробу та напружено-деформований стан здеформованого металу.

4. Розрахунковим шляхом виявлені всі необхідні параметри для виконання двохперехідного штампування конусних виробів та проектування штампового оснащення.

**Список літератури**

1. Романовский В. П. Справочник по холодной штамповке. 6-е изд., перераб. и доп. / В. П. Романовский. — Ленингр. отд-ние: Машиностроение. 1979. — 520 с.
2. Ковка и штамповка: Справочник: В 4 т. Т. 4. Листовая штамповка / Под ред. А.Д. Матвеева; Ред. совет: Е.И. Семенов (пред.) и др. — М.: Машиностроение, 1985–1987. — 544 с.
3. Аверкиев Ю. А. Холодная штамповка / Ю. А. Аверкиев. Издательство Ростовского университета, 1984. — 288 с.
4. Аверкиев Ю. А. Технология холодной штамповки / Ю. А. Аверкиев., А. Ю. Аверкиев. — М.: Машиностроение, 1989. — 304 с.
5. Гречников В.Ф. Прогрессивные технологические процессы холодной штамповки / Ф.В. Гречников, А.М. Дмитриев, В.Д. Кухарь и др.; Под общ. ред. А.Г. Овчинникова. — М.: Машиностроение, 1985. — 184 с.
6. Валиев С.А. Комбинированная глубокая вытяжка листовых заготовок / С.А. Валиев. — М.: Машиностроение, 1973. — 176 с.
7. Калюжний О.В. Зменшення кількості переходів витягування вісесиметричних виробів з використанням матриці спеціального профілю / О.В. Калюжний // Обработка материалов давлением. Сб. научн. тр., Краматорск, ДГМА, 2013. №4 (37). — С. 93–97.
8. Калюжний О.В. Зменшення зусилля та підвищення продуктивності формотворення при комбінованому витягуванні вісесиметричних виробів / О.В. Калюжний // Вісник НТУ «ХП», Серія «Нові рішення в сучасних технологіях», Харків, № 42'2013. — С. 126–131.
9. Калюжний О.В. Порівняльний аналіз ефективності процесу комбінованого витягування в двоконусній матриці та матриці спеціального профілю / О.В. Калюжний // Обработка

материалов давлением. Сб. научн. тр., Краматорск, ДГМА, 2014, № 1(38). — С. 32–37.

10. Калюжний О.В. Комбіноване витягування вісесиметричних порожнистих виробів із листових заготовок з різних матеріалів в двоконусній традиційній матриці та матриці спеціального профілю / О.В. Калюжний, С.С. Соколовська // Обработка материалов давлением. Сборник научных трудов. — Краматорск, ДГМА, 2016 р. — №2 (41). — С. 203–211.

11. Калюжний О.В. Комбіноване витягування вісесиметричних порожнистих виробів з листових заготовок із сталі ASSI-316L в одноконусній матриці та матриці спеціального профілю / О.В. Калюжний, С.С. Соколовська // Обработка материалов давлением. Сборник научных трудов. — Краматорск, ДГМА, 2016 р. — №1 (42). — С. 157–164.

**References (transliterated)**

1. Romanovskiy V. P. *Spravochnik po holodnoy shtampovke*. 6-e izd., pererab. i dop. [Reference book of cold stamping]. Leningr. otd-nie: Mashinostroenie Publ., 1979. — 520 p.
2. *Kovka i shtampovka: Spravochnik: Vol. 4. Listovaya shtampovka/ Pod red.. A.D. Matveeva; [Forging and Stamping]*. — Moscow, Mashinostroenie Publ., 1985-1987. — 544 p.
3. Averkiev Yu. A. *Holodnaya shtampovka* [Cold pressing]. Izdatelstvo Rostovskogo universiteta, 1984. — 288 p.
4. Averkiev Yu. A. *Tehnologiya holodnoy shtampovki* [The technology of cold forming]. — Moscow, Mashinostroenie Publ., 1989. — 304 p.
5. Grechnikov V.F. *Progressivnye tehnologicheskie protsessy holodnoy shtampovki* [Progressive technological processes of cold stamping]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1985. — 184 p.
6. Valiev S.A. *Kombinirovannaya glubokaya vityazhka listovyyh zagotovok* [Combined deep drawing blanks]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1973. — 176 p.
7. Kalyuzhniy O.V. Zmenshennya kilkosti perehodiv vityaguvannya visesimetrichnih virobiv z vikoristannyam matritsi spetsialnogo profilyu [Reducing the number of transitions pulling axisymmetrical products using special profile matrix] // Obrabotka materialov davleniem. Sb. nauchn. tr., Kramatorsk, DGMA, 2013. No 4 (37). — P. 93–97.
8. Kalyuzhniy O.V. Zmenshennya zusillya ta pidvishchennya produktivnosti formoutvorenniya pri kombinovanomu vityaguvanni visesimetrichnih virobiv [The reduction efforts and productivity of forming the combined pulling axisymmetrical products]. *Visnik NTU «HP»*, [Bulletin of the Kharkov Polytechnic Institute. Seriya «Novi rishennya v suchasniy tehnologiyah»]. Kharkiv, No 42'2013. — P. 126–131.
9. Kalyuzhniy O.V. Porivnyalnyi analiz effektivnosti protsesu kombinovanogo vityaguvannya v dvokonusnyy matritsi ta matritsi spetsialnogo profilyu [Comparative analysis of the efficiency of the combined pulling in dvokonusnyy matrix and matrix special profile] // Obrabotka materialov davleniem. Sb. nauchn. tr., Kramatorsk, DGMA, 2014, No 1(38). — P. 32–37.
10. Kalyuzhniy O.V. Kombinovane vityaguvannya visesimetrichnih porozhnistih virobiv iz listovih zagotovok z riznih materialiv v dvohkonusnyy traditsiyiny matritsi ta matritsi spetsialnogo profilyu [Combined pulling axisymmetrical hollow products from sheet blanks of different materials in dvohkonusnyy traditional matrix and matrix special profile] // Obrabotka materialov davleniem. Sbornik nauchnyh trudov. — Kramatorsk, DGMA, 2016 r. — No 2 (41). — P. 203–211.
11. Kalyuzhniy O.V. Kombinovane vityaguvannya visesimetrichnih porozhnistih virobiv z listovih zagotovok iz stali ASSI-316L v odnokonusnyy matritsi ta matritsi spetsialnogo profilyu [Combined pulling axisymmetrical hollow Sheet steel blanks ASSI-316L in odnokonusnyy matrix and matrix special profile] // Obrabotka materialov davleniem. Sbornik nauchnyh trudov. — Kramatorsk, DGMA, 2016 r. — No 1 (42). — P. 157–164.

Надійшло (received) 03.11.2016

*Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions*

**Визначення параметрів двохперехідного штампування високих конусних виробів з листової заготовки із пластичної міді / І. С. Алієв, В. Л. Калюжний** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – № 30(1202). – С. 5–12. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2519-2671

**Определение параметров двухпереходной штамповки высоких конических изделий с листовой заготовки из пластичной меди / И. С. Алиев, В. Л. Калюжный** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – № 30(1202). – С. 5–12. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2519-2671

**Determination of the parameters of forming high conical products in two stages of plastic copper sheet workpiece / I. S. Aliev, V. L. Kaluzhny** // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy. – Kharkiv: NTU «KhPI» – 2016. – No 30 (1202). – P. 5–12. – Bibliogr.: 11 – ISSN 2519-2671

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Алієв Іграмотдін Серажхутдінович** – доктор технічних наук, професор, Донбаська державна машинобудівна академія, завідувач кафедри обробки металів тиском; тел.: (050)478-03-95; e-mail: igran-aliev@mail.ru.

**Алиев Играмотдин Серажхутдинович** – доктор технических наук, профессор, Донбасская государственная машиностроительная академия, заведующий кафедрой обработки металлов давлением; тел.: (050)478-03-95; e-mail: igran-aliev@mail.ru.

**Aliyev Igramotdin Serazhutdownovich** – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Donbass State Machine Engineering Academy, Head of the Department of Metal Forming by Pressure; tel.: (050)478-03-95; e-mail: igran-aliev@mail.ru.

**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.

**Калюжный 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.

**Kaluzhny 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.

УДК 621.777.01

Л. И. АЛИЕВА

**УПРАВЛЕНИЕ ФОРМООБРАЗОВАНИЕМ ДЕТАЛЕЙ С ФЛАНЦЕМ  
ПРИ ХОЛОДНОМ ВЫДАВЛИВАНИИ**

Рассмотрены кинематические варианты радиального выдавливания деталей с фланцем, отличающиеся способом подачи металла в приемную полость матрицы и регулированием высоты этой полости. Проведено энергетическим методом верхней оценки моделирование процесса возникновения утяжин при радиальном выдавливании трубчатых деталей с фланцем и установлены соотношения параметров и характер их влияния на величину утяжин. Выявлено различное влияние фактора трения на контактных поверхностях в зоне фланца и трубчатой части на процесс возникновения утяжин. Экспериментально и методом конечных элементов исследовано формоизменение при выдавливании утолщений на втулках. Дана оценка возможностям и ограничениям новых технологических приёмов: подъема полуматрицы, формирования технологического бурта, направленных на устранение или снижение дефектов формы типа утяжин при радиальном выдавливании фланцев. Рассмотрены также особенности выдавливания в зависимости от способа подачи металла в приемную радиальную полость матрицы. Полученные сведения позволят дать технологические рекомендации для получения качественных деталей с фланцами и утолщениями способом радиального выдавливания.

**Ключевые слова:** радиальное выдавливание, кинематические варианты, формообразование фланцев, утяжина, метод верхней оценки, метод конечных элементов, предотвращение утяжин.

Розглянуто кінематичні варіанти радіального видавлювання деталей з фланцем, що відрізняються способом подачі металу в приймальну порожнину матриці і регулюванням висоти цієї порожнини. Проведено енергетичним методом верхньої оцінки моделювання процесу виникнення утяжин при радіальному видавлюванні трубчастих деталей з фланцем і встановлені співвідношення параметрів і характер їх впливу на величину утяжин. Виявлено різний вплив фактора тертя на контактних поверхнях в зоні фланця і трубчастої частини на процес виникнення утяжин. Експериментально і методом кінцевих елементів досліджено формозмінення при видавлюванні потовщень на втулках. Дана оцінка можливостям і обмеженням нових технологічних прийомів: підйому полуматриці, формування технологічного бурта, спрямованих на усунення або зниження дефектів форми типу утяжин при радіальному видавлюванні фланців. Розглянуто також особливості деформованого стану та деформованості металу при видавлюванні в залежності від способу подачі металу в порожнину матриці. Отримані відомості дозволять дати технологічні рекомендації для отримання якісних деталей з фланцями і потовщеннями способом радіального видавлювання.

**Ключові слова:** радіальне видавлювання, кінематичні варіанти, формоутворення фланців, утяжині, метод верхньої оцінки, метод кінцевих елементів, запобігання утяжин.

The kinematic variants in radial extrusion process with parts of flange, different method of supplying metal in receiving die cavity and adjusting the height of the cavity considered. The upper bound method to simulate process that shows dimple defect in radial extrusion with hollow flange parts determined and the ratio of the parameters, character in effect of dimple dimension defined. The different effects of friction factor on contact surfaces in flange zone and hollow section in process with dimple defect determined. The experimental and the finite element method to investigate deformation in radial extrusion with hollow flange parts defined. The estimation of possibilities and limitations of new technological methods: lifting half matrix, the cavity forming technology, directed to eliminate or control defect form such as dimple in radial extrusion with hollow flange parts. The especially extrusion with depending on method of supplying metal in receiving die cavity considered. The results obtained allow us to give technological recommendation to determine high quality flange parts in radial extrusion process.

**Keywords:** radial extrusion, kinematic variants, flange forming, dimple, upper bound method, finite element method, dimple prevention

**Введение.** Перспективным методом получения осесимметричных деталей с фланцами и утолщениями в средней части является холодное выдавливание и, в частности, радиальное и комбинированное радиально – продольное выдавливание, характеризуемые истечением металла заготовки в поперечном направлении и заполнении радиальной полости разъемной матрицы [1–3].

У фланцев, которые получают поперечным радиальным выдавливанием, имеются характерные формы (грибовидность, клиновидность и др.), обусловленные особенностями пластического течения в поперечном направлении [1, 4–7]. При формообразовании методами холодной объемной штамповки полых деталей с фланцами, превышающими по высоте толщину стенки заготовки, появляются характерные отклонения формы в виде утяжин, складок и зажимов металла [3, 4, 8]. Известные в литературе исследования, посвященные данной проблеме, направлены в основном на прогнозирование процессов образования дефектов, особенно, при выдавливании высоких фланцев, и в меньшей степени, на поиск методов их предупреждения. Одним из способов

устранения подобных дефектов является использование возможностей управляемого поперечного выдавливания, основанного на реализации кинематических вариантов выдавливания [1, 5]. Поэтому поиск технологических способов, обеспечивающих получение качественных полых и сплошных деталей с высокими фланцами и утолщениями (отростками), является актуальной научной и производственной задачей.

Целью работы является оценка возможностей технологических приёмов (способов), направленных на снижение или устранение дефектов формы при выдавливании деталей с фланцами и утолщениями.

**Методика исследований.** Анализ процесса радиально-прямого выдавливания проводился с использованием энергетического метода верхней оценки и метода конечных элементов (МКЭ). Изучение закономерностей процесса формирования фланцев при радиальном выдавливании выполнено и с помощью математических и натуральных экспериментов.

**Анализ закономерностей формообразования.** Для управления формообразованием деталей с фланцами и утолщениями, получаемых радиальным

выдавливаним, використовуються різні прийоми силового і кінематичного впливу на деформовану заготовку. Способи радіального выдавливання можна розділити на дві великі групи, в залежності від кінематики руху деформуючих силових і формоутворюючих інструментів. До першої групи належать способи (технологічні схеми) выдавливання металу в радіальну приймальну порожнину постійної висоти (в строгому відповідності з визначенням поняття терміна «выдавливание»). Ограничення схем даної групи пов'язані з критичною висотою радіальної порожнини (1,5...2,5 товщини стінки порожньої заготовки), при перевищенні якої спостерігається втрата стійкості заготовки.

Способи радіального выдавливання другої групи, в яких передбачено зміну висоти приймальної радіальної порожнини відносним переміщенням полуматриць, забезпечують інтенсивне формозмінення в області выдавливаного фланця, що цілком доцільно для корекції його розмірів і запобігання або усунення небажаних відхилень форми (рис. 1).

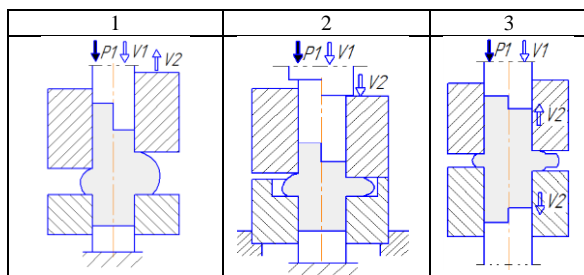


Рис. 1 – Способи выдавливання в порожнину змінної висоти

При виготовленні деталей з масивними фланцями ефективний варіант 1, при якому метал выдавлюється в круглу порожнину з неперервно збільшувальною висотою. Для забезпечення стійкості тонкостінної порожньої заготовки при выдавлюванні також рекомендується поступово збільшувати висоту приймальної круглої порожнини (варіант 1) за допомогою руху однієї або двох полуматриць [4, 9]. По 2-му варіанту проводиться послідовне двохстадійне комбінування радіального выдавливання і висадки. Реверсивне управляє переміщення полуматриць по ходу процесу выдавливання (3-й варіант) дозволяє отримувати в матриці з плоскими торцями різноманітні деталі з ступінчастими фланцями [5].



Рис. 2 – Виникнення дефектів типу утяжин при радіальному выдавлюванні фланців

При радіальному выдавлюванні втулок з фланцем, розташований в середній частині (утяженням) (рис. 2) при значеннях висоти порожнини, перевищують товщину стінки заготовки більше ніж 1,5...2,0 рази, на внутрішній поверхні в початку процесу з'являється кругова утяжина, перетворюючись в кінці выдавливання в складку. Глибина складки залежить від відносної висоти приймальної порожнини і може досягти значень, рівних товщині стінки заготовки.

Выдавливание відносно товстих фланців на кінці трубної заготовки (рис. 3) супроводжується явищем роздачі отвору з боку торця і утворенням утяжини (незаповненням кута). Роздача отвору у нижньому кінці втулки відбувається в початку процесу і при вільному выдавлюванні залежить від умов його подальшого протікання. Ограничення отриманого фланця по зовнішньому діаметру може усунути цей недолік, і граничні деталі оформляються достатньо точно. На роздачу отвору у нижньому торці або утворення утяжини у буртові впливає як значення відносної товщини фланця, так і умови тертя на торці нижньої полуматриці. При наявності в зоні контакту торця заготовки з полуматрицею навіть незначительного тертя, воно викликає затормажувальний вплив на выдавливану заготовку, що призводить до утворення утяжини на певній відстані від торця заготовки. Іноді це затормажувальне вплив перемагається над натиском поступаючого металу і утяжина самоустраняється, переміщується вниз і перетворюється далі в вид утяжини – «роздача отвору». При подальшому розвитку процесу під впливом зростаючих сил контактної тертя і під впливом підпора від кільцевої зони фланця розмір утяжини може поступово зменшуватися і в кутовій зоні незаповнення усувається повністю.

Це супроводжується і зменшенням зусилля выдавливання. В подальшому вона або перетворюється в складку, або самоустраняється під впливом поступаючого зверху потоку матеріалу. При завищених значеннях висоти приймальної порожнини спотворення форми полуфабриката набуває ще більш складний характер і фланець отримується з седлоподібним в сеченні верхнім торцем (см.



рис. 3, а). Если трение на торце заготовки устранить, то выдавливание, которое сопровождается активным скольжением торца заготовки, превращается в ускоренную раздачу и выворот трубчатой заготовки, особенно при увеличенной высоте полости. Торце заготовки отрывается от нижней полуматрицы и начинает формировать периферию и боковую поверхность фланца. Выворот одновременно сопровождается жёстким смещением заготовки вниз, материал заготовки отрывается от переходной кромки верхней полуматрицы. В результате этого на верхней плоскости выдавливаемого фланца появляется углубление (седлообразное сечение фланца), которое не устраняется до конца процесса. Периферия фланца приобретает особую форму – в виде закругления (обратной грибовидности), прилегающего к нижнему торцу фланца и образующего острую кромку, расположенную ближе к торцу верхней полуматрицы. При больших значениях толщины фланца (в экспериментах  $h=10$  мм) в зоне плавного перехода закругления к нижнему торцу фланца может образоваться второе углубление, которое является следствием зажима (складки) утяжины, образовавшейся в начале выдавливания на некотором удалении от заторможенного торца заготовки.

Рассмотренные варианты появления и трансформации утяжин наблюдались и при компьютерном КЭ-моделировании (см. рис. 3), что свидетельствовало о целесообразности проведения и компьютерных экспериментов по имитации процессов последовательного формоизменения заготовки при холодном выдавливании и при иных условиях деформирования и значениях параметров процесса.

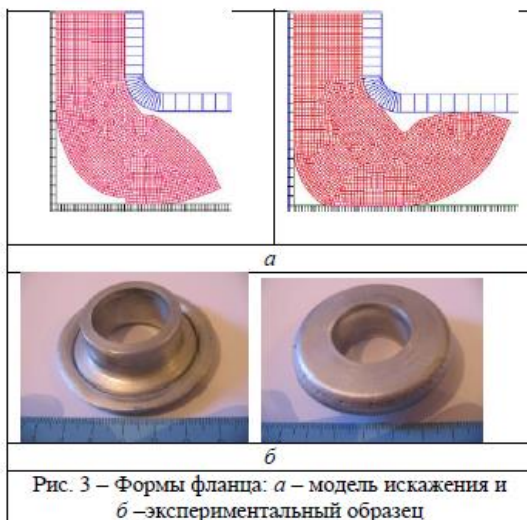


Рис. 3 – Формы фланца: а – модель искажения и б – экспериментальный образец

Для анализа процесса образования утяжин при осесимметричном радиальном выдавливании фланца на конце трубной заготовки энергетическим методом использована расчетная модель с применением деформируемого треугольного элемента с параболической "гипотенузой", описанного в работах [10, 11] (рис. 4).

При такой деформации устойчивому протеканию процесса соответствует равенство нулю значения утяжины  $y$ , а условие предотвращения утяжины состоит в соответствии значений давлений деформирования неравенству  $P_{(y=0)} < P_{(y>0)}$  [8, 11].

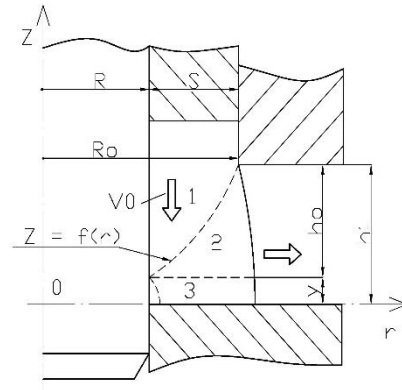


Рис. 4 – Расчетная схема для моделирования процесса образования утяжины

Уравнение границы между зонами 1 и 2 при появлении утяжины  $y$ :  $z = ar^2 - f$ .

При краевом условии  $z = h_1$  и  $r = R_0$ ,  $a = (h_1 + f)/R_0$ ,  $f = (h_1 m^2 - y)/(1 - m^2)$ ,

$$(m = R/R_0).$$

Функции скорости течения в зоне 2 и в зоне 3, удовлетворяющие условию непрерывности нормальной составляющей на поверхности параболоида и кинематическим граничным условиям равны [8, 10, 11]

$$V_r = \frac{U_0 R_0^2}{2(h_1 + f)r} = \frac{U_0(R_0^2 - R^2)}{2(h_1 - y)r};$$

$$V_z = 0. \quad (1)$$

После определения интенсивности скорости деформации в зонах 2 и 3, разрыва скорости на границе 1-2, равного  $[V] = V_0 \frac{\sqrt{1 - (2ra)^2}}{2ra}$  и вычисления мощностей сил деформирования, среза и сил трения получено расчетное выражение приведенного давления радиального выдавливания

$$\bar{p} = \frac{1}{\sqrt{3}} \left[ 1 - \frac{R_0 - R}{h_1 - y} + \frac{2\mu_2}{h_1 - y} (R_0 - R) + \frac{4(h_1 - y)(R_0^2 + R_0 R + R^2)}{3(R_0^2 - R^2)(R_0 + R)} + \frac{4\mu_1 R (h_1 - y)}{R_0^2 - R^2} \right] \quad (2)$$

Из уравнения  $\frac{\partial \bar{p}}{\partial y} = 0$  можно найти относительную величину утяжины  $\bar{y}$  ( $\bar{y} = y/h_1$ )



$$\bar{y} = 1 - \frac{\sqrt{3}}{2\bar{h}} \frac{1 - m^2}{\sqrt{m^2 + (1 + m)(1 + 3\mu_1 m)}}, \quad (3)$$

·  $\sqrt{1 + 2\mu_2}$   
 где  $m = R/R_0$ .

При значении  $y = 0$  получим относительную толщину (критическую) фланца  $\bar{h} = h_1/R_0$ , соответствующую началу образования утяжины и превышение которой вызывает опасность складкообразования при радиальном выдавливании

$$\bar{h} = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{1 - m^2}{\sqrt{m^2 + (1 + m)(1 + 3\mu_1 m)}} \cdot \sqrt{1 + 2\mu_2}. \quad (4)$$

Влияние основных параметров осесимметричного процесса на образование утяжины можно оценить как аналогичное процессу плоского выдавливания [12, 13]. Графики критических значений фланца  $\bar{h}_1$  (рис. 5) показывают, что с ростом коэффициента трения  $\mu_2$  область предельных допускаемых величин  $\bar{h}_1$  увеличивается, а с увеличением  $\mu_1$  напротив – уменьшается. При  $\mu_2 = 0$  изменение  $\mu_1$  в пределах от 0 до 0,5 приводит к уменьшению предельно допустимого значения параметра  $h_1/S$  от 1,0 до ~0,71.

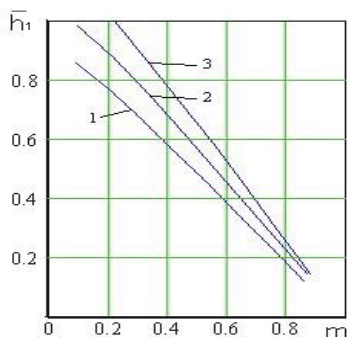


Рис. 5 – Зависимость относительной толщины фланца  $\bar{h}$  появления утяжины от относительной толщины стенки трубчатой заготовки: 1 –  $\mu_2=0.082$ ; 2 –  $\mu_2=0.253$ ; 3 –  $\mu_2=0.50$ ;  $y=0$ ,  $\mu_1=0.08$

Величина утяжины увеличивается с уменьшением трения на выходных поверхностях ( $\mu_2$  по нижней полуматрице) или с увеличением трения ( $\mu_1$ ) по верхней полуматрице и оправке. С точки зрения повышения величины  $\bar{h}_{кр}$  и расширения тем самым возможностей процесса выдавливания трение металла по нижней полуматрице ( $\mu_2$ ) играет, как и ожидалось, положительную роль.

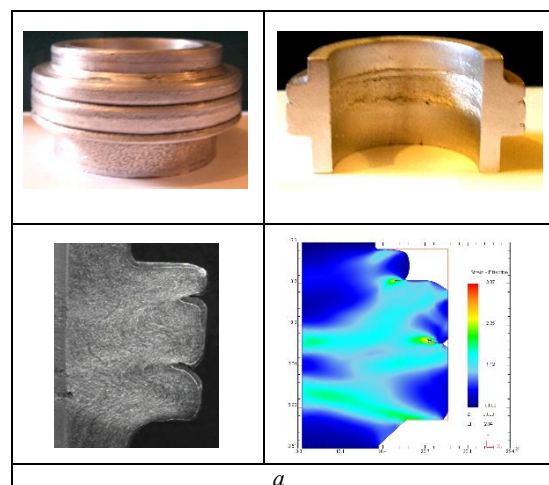
Этим можно объяснить явление постепенного снижения угловой утяжины при увеличении диаметра выдавливаемого торцевого фланца. Отсюда следует рекомендовать торец нижней полуматрицы

шероховатым, а полость сужающимся, в том числе и за счет придания конусности торцу полуматрицы. В то же время для снижения затрат трения по оправке сделать трение активным для чего перемещать оправку в направлении движения пуансона. Эксперименты, таким образом, подтверждают теоретические прогнозы построенных моделей возникновения утяжин. В этом отношении прогнозы, полученные при помощи моделей, полученных МКЭ и энергетическим методом, оправдываются. Уже при значениях относительной толщины фланца  $h_1/s = 0,8$  появляется утяжина.

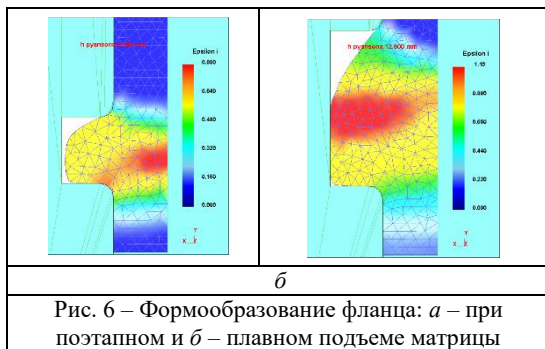
Экспериментальные исследования были посвящены также оценке возможностей технологических приёмов (способов) направленных на снижение или устранение утяжин.

Вначале были рассмотрены возможности способа [1, 6, 9], предусматривающее его поэтапное увеличение высоты приёмной полости.

Были рассмотрены возможности способа [1, 6], предусматривающего постадийное увеличение высоты приёмной полости (в данном случае с 5 мм до 8 мм и 10 мм). Установлено, что поэтапный подъем полуматрицы при холодном выдавливании может оказаться неэффективным, так как добавление нового кольцевого слоя укладыванием его на верхнюю торцевую поверхность уже сформированного фланца вызывает определенные трудности. Новый объем металла не вливается и не смешивается полностью с уже сформированным фланцем. Хотя в конце очередного этапа они и объединяются, это сопровождается появлением утяжин, но уже на наружной боковой поверхности фланца (см. рис. 6). Для моделирования процесса радиального выдавливания фланцев в штампе с подвижной полуматрицей был также применен метод конечных элементов [4, 9, 12].



а



Для сплава АМц-М при КЭ-моделировании использованы следующие размеры образцов и инструмента:  $2R = 21,0$  мм,  $2R_0 = 28,2$  мм,  $h_1 = 5,0$  мм. Граничные условия для осесимметричной задачи были заданы в следующем виде: кривая упрочнения сплава описана зависимостью  $\sigma_s = 220 \cdot e^{0,11} \text{ МПа}$ , плотность материала  $2800 \text{ кг/м}^3$ ; модуль Юнга  $71000$  МПа; коэффициент Пуассона  $0,3$ ; скорость перемещения инструмента  $1$  мм/с; инструмент абсолютно жесткий.

Моделирование с проведением имитационных экспериментов подтвердило, что в начальной стадии процесса для повышения устойчивости целесообразно выдавливать в штампах с подвижной полуматрицей фланец меньшей толщины (рис. 6).

Имитационные компьютерные конечно-элементные модели хорошо отражают картину развития деформаций и отклонений формы деталей, а также появление таких дефектов, как образование наплывов (наростов) и углублений на наружной боковой поверхности фланцев при поэтапном подъеме полуматрицы, образующей радиальную полость (см. рис. 6).

Возможности метода подъема полуматриц с целью постепенного увеличения высоты приемной радиальной полости [1, 6] оказались не такими уж бесспорными и потребовали дальнейшей проверки. Видимо, поэтапный подъем полуматрицы можно рекомендовать лишь для процессов горячего деформирования.

Большого эффекта можно достичь при регулировании высоты полости за счет управления кинематикой движения полуматриц [1, 8, 9]. Конечно-элементное проектирование показало: при использовании схемы деформирования без ограничения течения металла во фланец оптимальная скорость движения матрицы равна  $\frac{1}{4}$  скорости пуансона, при этом толщина фланца превышает толщину стенки заготовки не менее, чем в 2 раза. Однако форма утолщения при свободном выдавливании получается «грибовидной», что ограничивает возможности применения втулки с таким фланцем в качестве деталей машин без дополнительной доработки. В случае ограничения диаметра приемной полости «грибовидность»

устраняется, деформации распределяются по объему фланца более равномерно. Скорость движения матрицы зависит от сечения фланца и может достигать  $0,1 \dots 0,65$  от скорости пуансона. Внедрение подобных схем в производство требует создания усложненной оснастки, имеющей независимый или связанный с движением главного инструмента привод для движения полуматрицы, или специализированных прессов двойного действия.

Способ устранения утяжин при помощи формирования специального технологического («временного») бурта, получаемого совмещенным радиальным выдавливанием на внутренней боковой поверхности трубчатой заготовки (рис. 7) оказался более эффективным, хотя и для него присущи отдельные ограничения [9]. Имитационные эксперименты, выполненные при помощи программного пакета МКЭ, показали эффективность приема формирования технологических буртов.

Заполнение на первом этапе выдавливания технологического бурта, расположенного на внутренней боковой поверхности трубчатой заготовки, происходит без затруднений. Для этого на оправке предусмотрена выемка, размеры которой были подобраны по результатам КЭ – моделирования. Высота бурта преимущественно равняется толщине фланца, а ширина принимается равной  $10\text{--}20\%$  толщины стенки трубчатой заготовки, переходы должны быть плавными. При недостаточной высоте и ширине (глубине выемки) технологического бурта при последующем радиальном выдавливании наружного фланца предотвращение утяжины затруднительно. Вместе с тем, формирование технологического бурта с избыточным объемом делает затруднительным последующее разглаживание бурта. Остаток излишнего объема металла при разглаживании срезается и остается в выемке оправки. Для обеспечения разглаживания бурта без среза полезно оставить незаполненной основную радиальную полость под наружный фланец. Формирование технологического бурта целесообразно для упреждения утяжин и при обратном выдавливании полых деталей типа стакана с относительно тонким дном [14].

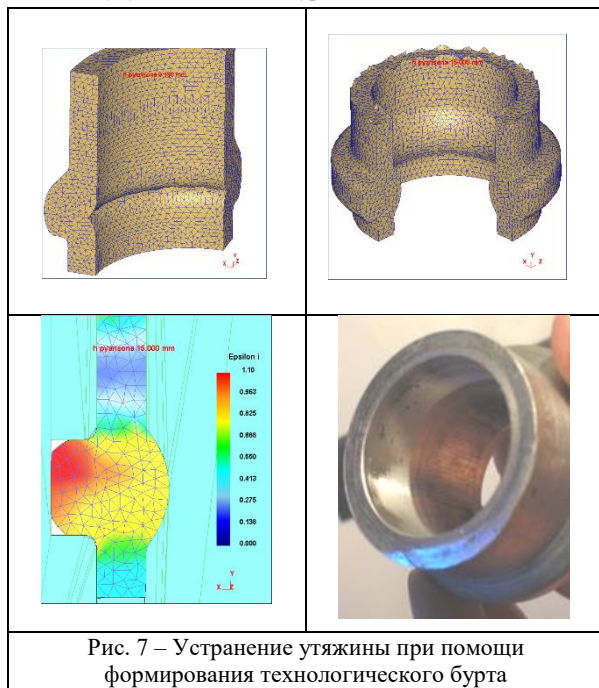


Рис. 7 – Устранение утяжины при помощи формирования технологического бурта

Особенностью технологии поперечного радиального выдавливания, как уже было отмечено, является возможность активного регулирования деформационных и силовых параметров процесса посредством изменения кинематики движения формообразующего инструмента. На рис. 8 приведены некоторые способы (кинематические варианты) радиального выдавливания из первой группы [1, 3].

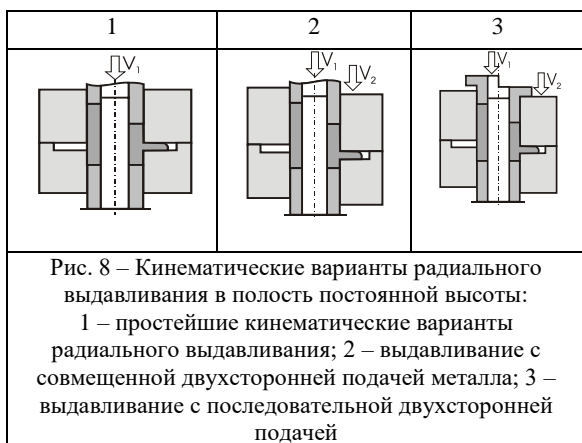


Рис. 8 – Кинематические варианты радиального выдавливания в полость постоянной высоты:  
1 – простейшие кинематические варианты радиального выдавливания; 2 – выдавливание с совмещенной двухсторонней подачей металла; 3 – выдавливание с последовательной двухсторонней подачей

Простейшие кинематические варианты радиального выдавливания (рис. 8, схема 1) осуществляются с односторонней подачей металла в рабочую полость неподвижной матрицы. Выдавливание с совмещенной двухсторонней подачей металла осуществляется встречным движением пуансонов или принудительным перемещением матрицы со скоростью, меньшей примерно в 2 раза скорости движения пуансона (схема 2) [1]. По 3-му варианту осуществляется выдавливание с последовательной двухсторонней подачей, обеспечивающей лучшее заполнение радиальной полости.

Разницу в деформированном состоянии деталей, полученных выдавливанием с односторонней подачей металла (одностороннее выдавливание) и двусторонним выдавливанием можно продемонстрировать на примере искажения делительной сетки, нанесенной на деталь перед поперечным выдавливанием (рис. 9). При одностороннем поперечном (как боковом, так и радиальном) выдавливании очаг интенсивной деформации имеет несимметричную форму. Зона максимальной деформации и, соответственно, зона максимального упрочнения смещаются к нижней границе очага деформации, на которой происходит резкий скачок степени деформации металла. Такая неравномерность деформации вызывает опасность исчерпания ресурса пластичности металла вдоль этой границы. При боковом выдавливании утолщений и отростков трещины появляются даже при деформировании высокопластичных алюминиевых сплавов (см. рис. 9). Это также снижает эксплуатационную надежность холодновыдавленных изделий. Фланцы (на деталях изоляторных подвесок из стали 20), полученные радиальным односторонним выдавливанием, отделялись при нагружении по практически гладкой поверхности (см. рис. 9).

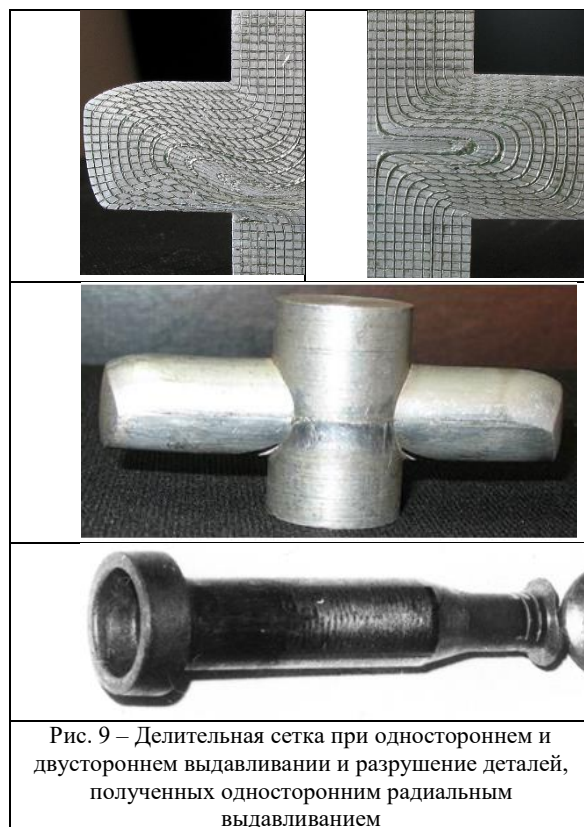


Рис. 9 – Делительная сетка при одностороннем и двустороннем выдавливании и разрушение деталей, полученных односторонним радиальным выдавливанием

При двустороннем выдавливании очаг деформации имеет симметричную форму, меньшую высоту и объем, что может быть недостатком, так как на переходных наиболее нагруженных участках металл может быть недостаточно упрочненным. Различные сочетания движений и нагружений

пуансонов позволили создать ряд технологических способов, которые регулируют положение зоны максимального упрочнения металла по высоте очага деформации, степень заполнения приемной полости матрицы и форму выдавливаемого фланца. Для устранения опасности разрушения детали на переходном к фланцу участке при одновременном обеспечении достаточной прочности предложено дополнять одностороннее выдавливание двусторонним деформированием на заключительной стадии [16]. Для этой же цели одностороннее радиальное выдавливание фланца предваряют высадкой, выполняемой на том же переходе [17]. Устранению дефектов типа утяжин и грибовидности фланцев способствует комбинированное радиальное выдавливание, включающее предварительный набор металла в полость подвижной матрицы и последующую высадку фланца [18].

**Выводы.** Рассмотрены разновидности технологических схем поперечного радиального выдавливания. Экспериментально и с помощью методов верхней оценки и конечных элементов исследовано формообразование фланцев и утолщений на полых и сплошных деталях при радиальном выдавливании. Дана оценка возможностям и ограничениям новых технологических приёмов: движения полуматриц, формирования технологического бурта, направленных на устранение или снижение дефектов формы типа утяжин при радиальном выдавливании наружных фланцев. Полученные сведения позволяют дать технологические рекомендации для обеспечения получения деталей с фланцами без дефектов методом радиального выдавливания.

#### Список литературы

1. Алиев И. С. Технологические процессы холодного поперечного выдавливания / И. С. Алиев // Кузнечно-штамповочное производство. – 1988. – № 6. – С. 1–4.
2. Евстратов В. А. Основы технологии выдавливания и конструирования штампов / В. А. Евстратов. – Харьков: Вища школа, 1987. – 144 с.
3. Алиева Л. И. Формообразование утолщений на полых и сплошных заготовках / Л. И. Алиева, Р. С. Борисов // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: зб. наук. пр. – Краматорськ: ДДМА, 2003. – С. 262–267.
4. Прогнозирование дефектообразования в процессе радиального выдавливания / Л. И. Алиева, И. С. Алиев, П. Б. Абхари, О. В. Патык // Вісник національного технічного університету України «ХПІ»: збірник наукових праць. – Харків, 2011. – № 47. – С. 140–145.
5. Шибаков В. Г. Влияние параметров управляемого поперечного выдавливания на образование дефектов в поковках ступенчатой формы / В. Г. Шибаков, М. Н. Гончаров, С. Н. Гончаров // Кузнечно-штамповочное производство. – 2005. – № 8. – С. 7–9.
6. Пасько А. Н. Холодная объемная штамповка осесимметричных заготовок: монография / А. Н. Пасько. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2004. – 252 с.
7. Гусинский В. И. О возможностях процессов холодного прессования / В. И. Гусинский // Разработка и исследование технологических процессов ОМД. – М.: Машиностроение, 1968. – С. 45–56.
8. Джонсон В. Механика процессов выдавливания металла / В. Джонсон, Х. Кудо. – М.: Металлургия, 1966. – 317 с.
9. Алиева Л. И. Получение утолщений при радиальном выдавливании втулок / Л. И. Алиева, С. В. Мартынов, Л. Н. Соколов // Научный вестник ДГМА. – Краматорск: ДГМА,

2007. – № 2Е (10). – С. 83–87. – Режим доступа: [http://www.dgma.donetsk.ua/science\\_public/science\\_vesnik/TITUL.html](http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/science_vesnik/TITUL.html).

10. Alexander I. On the Cold Extrusion of Flanges against High Hydrostatic Pressure / I. Alexander, B. Lengyel // I. Inst. Metals. – 1964–1965. – Vol. 93. – Part 5. – P. 137–145.

11. Алиев И. С. Прогнозирование дефектообразования при выдавливании / И. С. Алиев, К. Крюгер // Теория, технология оборудования и автоматизация обработки металлов давлением, резанием: сб. науч. тр. – Тула: ТулГУ, 1999. – Вып. 1. – С. 87–90.

12. Алиева Л. И. Оценка и прогнозирование отклонений формы деталей при холодном выдавливании / Л. И. Алиева // Пластическая деформация металлов: коллективная монография. – Днепропетровск: НМетАУ, 2014. – С. 353–369. – ISBN 978-617-7109-18-0.

13. Prediction of the variation of the form in the processes of extrusion / I. Aliiev, L. Alieva, N. Grudkina, I. Zhabankov // Scientific and technical journal Metallurgical and mining industry. – Dnepropetrovsk, 2011. – Vol. 3. – № 7. – P. 17–22.

14. Пат. 13745 Україна, В21 К21/00. Способ изготовления деталей типа втулок с фланцем / Л. И. Алиева (Украина). – № 200509939; заявл. 21.10.2005; опубл. 17.04.2006, Бюл. № 4.

15. Пат. 74528 Україна, МПК В 21 К 21/00. Спосіб одержання порожнистих виробів з тонким дном / І. С. Алієв, І. Г. Савчинський, Р. С. Борисов, Алієва Л. І.; власник Донбаська державна машинобудівна академія. – № 20031211209; заявл. 09.12.2003; опубл. 15.12.2005, Бюл. № 12.

16. Пат. 84078 Україна, МПК В 21 К 21/00. Спосіб виготовлення деталей з бічними відростками / Л. І. Алієва, О. М. Бровкін, І. А. Деревенько, О. А. Жукова, В. В. Цимбаліст; заявник та патентовласник Донбаська державна машинобудівна академія. – № u201304310; заявл. 05.04.13; опубл. 10.10.13, Бюл. № 19.

17. Пат. 51926 Україна, В21К21/00. Спосіб виготовлення деталей типу втулки з фланцем / Л. І. Алієва, С. В. Мартинов, М. С. Москаленко; заявник і патентовласник Донбаська державна машинобудівна академія. – № 201000434; заявл. 18.01.2010; опубл. 10.08.2010, Бюл. № 15.

18. Пат. 48902 Україна, МПК В21 К 21/00. Спосіб виготовлення деталей типу втулки з зовнішнім фланцем / П. Абхари, І. С. Алієв, Л. І. Алієва, С. В. Мартинов; заявник і патентовласник Донбаська державна машинобудівна академія. – № 200910370; заявл. 13.10.2009; опубл. 12.04.2010, Бюл. № 7.

#### References (transliterated)

1. Aliiev I. S. *Tehnologicheskie processy holodnogo poperechnogo vydavlivaniya* [Processes of cold extrusion cross] *Kuznechno-shampovnochnoe proizvodstvo*, 1988. – № 6. – P. 1–4.
2. Evstratov V. A. *Osnovy tehnologii vydavlivaniya i konstruirovaniya shtampov* [Fundamentals of technology of extrusion and die design]. Har'kov: Vishha shkola Publ., 1987. – 144 p.
3. Alieva L. I. *Formoobrazovanie utolshhenij na polyh i sploshnyh zagotovkah* [Shaping bulges on hollow and solid workpieces] *Udoskonalennija procesiv i obladdannija obrobki tiskom v metalurgii i mashinobuduvanni: zb. nauk. pr. Kramators'k-Slov'jansk'k: DDMA*, 2003. – P. 262–267.
4. *Prognozirovanie defektoobrazovaniya v processe radial'nogo vydavlivaniya* [Prediction defect in the process of radial extrusion] *Visnyk NTU "KhPI"* [Bulletin of the National Technical University "KhPI"]. Kharkov, NTU "KhPI", 2011. – No 47. – P. 140–145.
5. Shibakov V. G. *Vlijanie parametrov upravljajemogo poperechnogo vydavlivaniya na obrazovanie defektov v pokovkah stupenchatoj formy* [Influence of parameters of managed cross-extrusion on the formation of defects in forgings step form]. *Kuznechno-shampovnochnoe proizvodstvo*, 2005. – No 8. – P. 7–9.
6. Pas'ko A. N. *Holodnaja obemnaja shtampovka osesimmetrichnyh zagotovok: monografija* [Cold forging of axially symmetric workpieces]. Tula: Izd-vo TulGU, 2004. – 252 p.
7. Gusinskij V. I. *O vozmozhnostjah processov holodnogo pressovanija* [On the possibilities of cold pressing processes]. *Razrabotka i issledovanie tehnologicheskikh processov OMD*. – Moscow: Mashinostroenie Publ., 1968. – P. 45–56.
8. Dzhonson V. *Mehanika processov vydavlivaniya metalla* [Mechanics metal extrusion processes]. – Moscow: Metallurgija Publ., 1966. – 317 p.
9. Alieva L. I. *Poluchenie utolshhenij pri radial'nom vydavlivanii vtulok* [Getting thickenings at a radial extrusion of sleeves]. *Nauchnyj vestnik DGMA*. – Kramatorsk: DGMA, 2007. – No 2E (10). – P. 83–87. – Rezhim dostupa: [http://www.dgma.donetsk.ua/science\\_public/science\\_vesnik/TITUL.html](http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/science_vesnik/TITUL.html).



10. Alexander I. On the Cold Extrusion of Flanges against High Hydrostatic Pressure // I. Inst. Metals. – 1964–1965. – Vol. 93. – Part 5. – P. 137–145.

11. Aliiev I. S. Prognozovanie defektoobrazovanija pri vydavlivanii [Prediction defect during extrusion]. *Teorija, tehnologija oborudovanija i avtomatizacija obrabotki metallov davleniem, rezaniem: sb. nauch. tr.* – Tula: TulGU, 1999. – Vyp. 1. – P. 87–90.

12. Aliieva L. I. Ocenka i prognozovanie otklonenij formy detalej pri holodnom vydavlivanii / L. I. Aliieva // *Plasticheskaja deformacija metallov: kollektivnaja monografija.* – Dnepropetrovsk: NMetAU, 2014. – P. 353–369. – ISBN 978-617-7109-18-0.

13. Prediction of the variation of the form in the processes of extrusion // *Scientific and technical journal Metallurgical and mining industry.* – Dnepropetrovsk, 2011. – Vol. 3. – No 7. – P. 17–22.

14. Pat. 13745 Ukraina, V21 K21/00. Sposob izgotovlenija detalej tipa vtulok s flancem / L. I. Aliieva (Ukraina). – No 200509939; zajavl. 21.10.2005; opubl. 17.04.2006, Bjul. No 4.

15. Pat. 74528 Ukraina, MPK V 21 K 21/00. Sposib oderzhannja porozhnistih virobiv z tonkim dnom / I. S. Aliiev, I. G. Savchinskij, R. S. Borisov, L. I. Aliieva; vlasnik Donbas'ka derzhavna

mashinobudivna akademija. – No 20031211209; zajavl. 09.12.2003; opubl. 15.12.2005, Bjul. No 12.

16. Pat. 84078 Ukraina, MPK B 21 K 21/00. Sposib vigotovlennja detalej z bichnimi vidrostkami / L. I. Aliieva, O. M. Brovkin, I. A. Dereven'ko, O. A. Zhukova, V. V. Cimbalist; zajavnik ta patentovlasnik Donbas'ka derzhavna mashinobudivna akademija. – No u201304310; zajavl. 05.04.13; opubl. 10.10.13, Bjul. No 19.

17. Pat. 51926 Ukraina, V21K21/00. Sposib vigotovlennja detalej tipu vtulki z flancem / L. I. Aliieva, S. V. Martinov, M. S. Moskalenko; zajavnik i patentovlasnik Donbas'ka derzhavna mashinobudivna akademija. – No 201000434; zajavl. 18.01.2010; opubl. 10.08.2010, Bjul. No 15.

18. Pat. 48902 Ukraina, MPK V21 K 21/00. Sposib vigotovlennja detalej tipu vtulki z zovnishnim flancem / P. Abhari, I. S. Aliiev, L. I. Aliieva, S. V. Martinov; zajavnik i patentovlasnik Donbas'ka derzhavna mashinobudivna akademija. – No 200910370; zajavl. 13.10.2009; opubl. 12.04.2010, Bjul. No 7.

Поступила (received) 13.08.2016

*Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions*

**Управление формообразованием деталей с фланцем при холодном выдавливании / Алиева Л. И. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – № 30(1202). – С. 13–20. – Бібліогр.: 18 назв. – ISSN 2519-2671**

**Управління формоутворенням деталей з фланцем при холодному видавлюванні / Алієва Л. І. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – № 30(1202). – С. 13–20. – Бібліогр.: 18 назв. – ISSN 2519-2671**

**The control of part forming with flange in cold forging / Aliieva L. I. // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy. – Kharkiv: NTU «KhPI» – 2016. – No 30 (1202). – P. 13–20. – Bibliogr.: 18 – ISSN 2519-2671**

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Алиева Лейла Игратовдиновна** – кандидат технических наук, доцент, докторант кафедры «Обработка металлов давлением» Донбасской государственной машиностроительной академии, ул. Парковая, 61/85, г. Краматорск, Украина, 84301, тел.: (06264) 41-67-20, e-mail: omd@dgma.donetsk.ua

**Алієва Лейла Ігратовдіновна** – кандидат технічних наук, доцент, докторант кафедри «Обробка металів тиском» Донбаської державної машинобудівної академії, вул. Паркова, 61/85, м. Краматорськ, Україна, 84301, тел.: (06264) 41-67-20, e-mail: omd@dgma.donetsk.ua

**Aliieva Leila**, Ph.D. – associate professor, Doctoral Student of the Department "Metal Forming" Donbass State Engineering Academy, ul. Park, 61/85, Kramatorsk, Ukraine, 84324, contact phone: (06264) 41-67-20, e-mail: omd@dgma.donetsk.ua

УДК 621.73.043:621.73.011-016

Т. В. ГАЙКОВА

**КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНАЯ МОДЕЛЬ ДЕФОРМИРОВАНИЯ БИМЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ЗАГОТОВКИ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ ВЫТЯЖКОЙ КОРОбЧАТЫХ ДЕТАЛЕЙ**

На основании метода конечных элементов смоделированы процессы вытяжки из биметалла алюминий-медь коробчатых деталей для различных типов заготовок. При моделировании использованы различные комбинации слоев материала, что позволяет судить о влиянии расположения слоев материала и формы заготовки на параметры процесса. Ориентируясь по моделям деформируемого состояния при получении коробчатых деталей из биметалла оптимальной формой для заготовки является «прямоугольник со срезанными углами» и внешним расположением слоя меди.

**Ключевые слова:** конечно-элементная модель, биметалл, форма заготовки, вытяжка, интенсивность напряжений, деформирование.

На підставі методу скінченних елементів змодельовані процеси витягування з биметалу алюміній-мідь коробчастих деталей для різних типів заготовок. При моделюванні використані різні комбінації шарів матеріалу, що дозволяє судити про вплив розташування шарів матеріалу і форми заготовки на параметри процесу. Орієнтуючись по моделям деформованого стану при отриманні коробчастих деталей з биметалу оптимальною формою для заготовки є «прямокутник зі зрізаними кутами» і зовнішнім розташуванням шару міді.

**Ключові слова:** кінцево-елементна модель, биметал, форма заготовки, витяжка, інтенсивність напружень, деформування.

Based on the finite element method modeled processes extract from bimetal aluminum-copper box of parts for various types of workpieces. In the simulation used various combinations of layers of material that gives an indication of the impact location and the material layers to form the preform process. parameters. The intensity of the maximum voltage at the radius of curvature of the punch and reaches 350 MPa for the layer of copper and 260 MPa for the aluminum layer; a layer of copper is necessary to have the matrix, if permitted by manufacturing conditions, it reduces the intensity of the stresses in the layer of copper from 315 MPa to 250 MPa; used harvesting – a rectangle with beveled edges, decrease the maximum stresses and strains intensity from 315 MPa to 300 MPa, from 0.67 to 0.65 for the internal arrangement of copper and from 282 MPa to 250 MPa, from 0.63 to 0.59 for the external copper location; with a depth of 0.04 m  $\epsilon_i = 0,56-0,$ ; with increasing depth of the hood grow as the stress intensity and strain intensity (at a depth of 0.02 m proshampovki  $\epsilon_i = 0,3-0,375$ ;  $\sigma_i = 200-230$  MPa 67;  $\sigma_i = 300-315$  MPa).

**Keywords:** finite element model, the bimetal, the shape of the work piece, hood, stress intensity, deformation.

**Введение.** Комплекс ANSYS позволяет создавать непосредственно сетку конечных элементов (то есть узлы и элементы), а также геометрическую модель, на основе которой далее создается сетка конечных элементов. Пример сетки конечных элементов показан на рис. 1.

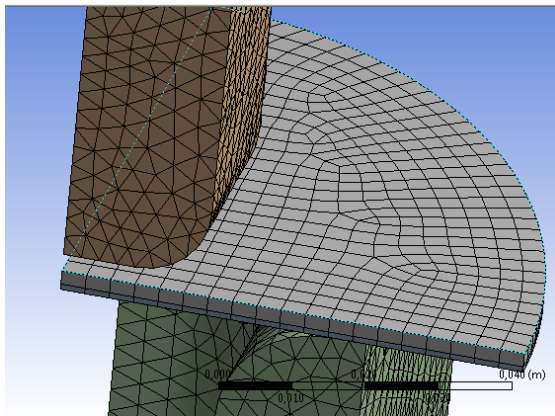


Рис. 1 – Разбивка заготовки на конечные элементы

Геометрическая модель или ранее созданная сетка также могут импортироваться в среду комплекса ANSYS из внешних файлов.

**Актуальность работы.** В связи с развитием и широким распространением средств САД импорт ранее созданных файлов представляется наиболее удобным вариантом создания расчетных моделей, который может применяться в инженерной практике. На основании метода конечных

элементов можно смоделировать процессы вытяжки из биметалла алюминий-медь коробчатых деталей для различных типов заготовок, использовать различные комбинации слоев материала, что затруднительно проводить другими методами теоретического анализа.

**Цель работы.** На основании метода конечных элементов смоделировать процессы вытяжки из биметалла алюминий-медь коробчатых деталей для различных типов заготовок. При моделировании использовать различные комбинации слоев материала, что позволит судить о влиянии расположения слоев материала и формы заготовки на параметры процесса, а также геометрических параметров инструмента на усилие вытяжки, поле напряжений и деформаций, сравнение результатов моделирования с аналитическим расчетом и опытными данными.

**Материал и результат исследований.** Выбор типов заготовок для получения коробчатой детали. Материал, форма и геометрические размеры коробчатой детали показаны на рис. 2. Расположение слоев материала при расчете параметров модели деформирования будет чередоваться.

Расчет заготовки для процесса вытяжки проводили согласно методикам, изложенным В.П. Романовским и В.И. Стеблюком для пустотелых коробчатых деталей, получаемых вытяжкой за один переход [1, 2]. Построенная заготовка имеет форму, приближенную к овалу.

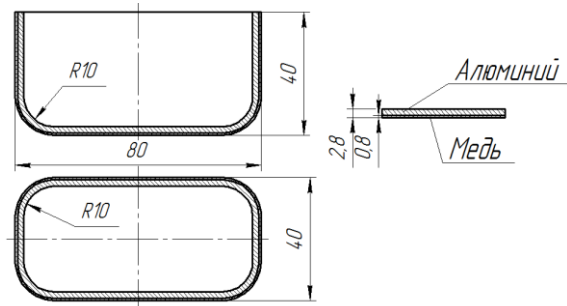


Рис. 2 – Матеріал і геометричні розміри проектуваної коробчатої деталі

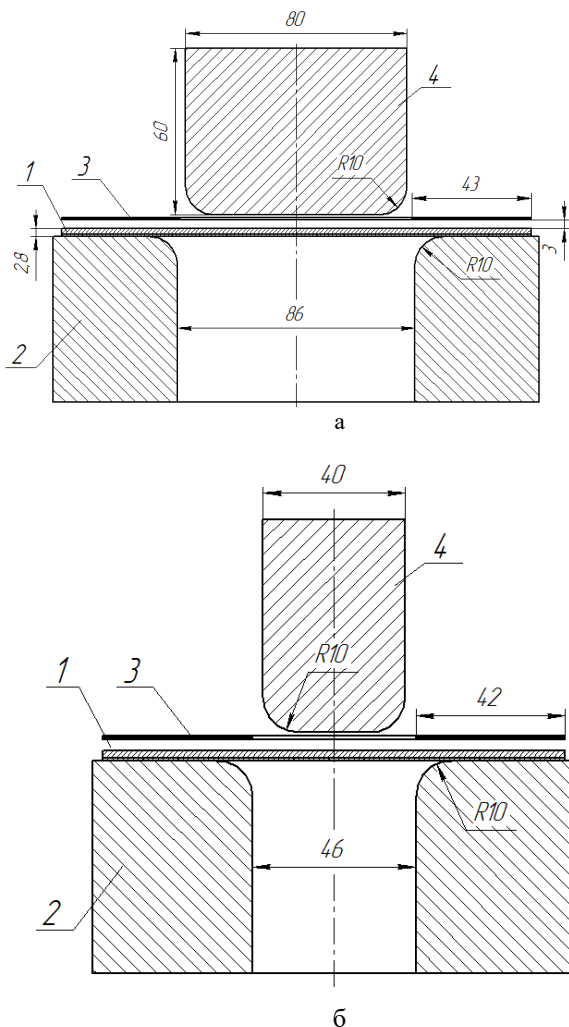


Рис. 3 – Фізична модель розположення заготовок і інструмента: а – фронтальний вид, б – профільний вид.

1 – заготовка; 2 – матриця; 3 – прижим; 4 – пуансон

Для уточнення оптимальної форми заготовки для витяжки коробчатих деталей використовуємо ще ряд приблизно розрахованих заготовок для процесу витяжки [3]. Это:

- круг;
- прямокутник со скошенными углами;

- прямокутник со срезанными углами;
- прямокутник с закругленными углами.

Так же для сравнения используем еще неприменяемую форму заготовки: прямокутник.

Режим витяжки: витяжка однопереходная, без утонения стенок, с прижимом. Прижим используем для устранения образования складок. Величина прижима принимается равной 2,5 МПа [4]. Физическая модель расположения заготовок и инструмента показана на рис. 3 (а–б).

### Последовательность решения задачи.

1. Вычерчиваем заготовку детали и инструмент в программе SolidWorks.

1.1. Сохраняем в формате IGS.

2. Импортируем файл в программу ANSYS, создавая геометрическую модель.

2.1. Задаем привязку расположения заготовки и инструмента для определения контактирования их между собой.

2.2. Поскольку задача осесимметричная, достаточно четвертой части модели.

2.3. Привязываем расположение заготовки относительно инструмента.

2.4. Задаем коэффициент трения между материалом и инструментом равным 0,1 для алюминия и 0,2 для меди.

2.5. Задаем матрицу полностью неподвижной по всем осям.

2.6. Ограничиваем возможность перемещения пуансона осью Y.

3. Выбор материала заготовки и инструмента.

3.1. Материалу матрицы и пуансона задаем нулевые перемещения, то есть, принимаем их абсолютно жесткими.

3.2. Для внешнего слоя (или внутреннего – в зависимости от расположения слоев) принимаем материалом отожженную медь, а для внутреннего (или внешнего) – отожженный алюминий.

3.3. Задаем механические свойства меди и алюминия

– предел текучести:

а) меди – 150 МПа;

б) алюминия – 50 МПа.

– модуль упругости:

а) меди – 560 МПа;

б) алюминия – 320 МПа.

– модуль упругости:

а) меди –  $1,17 \cdot 10^5$  МПа;

б) алюминия –  $0,66 \cdot 10^5$  МПа.

– коэффициент Пуассона:

а) меди – 0,35;

б) алюминия – 0,34.

– плотность:

а) меди – 8,94 кг/см<sup>3</sup>;

б) алюминия – 2,7 кг/см<sup>3</sup>.



3.4. Задаем характер взаимосвязи между слоями – полное сцепление (связь слоев задается полной, как у однородного тела) с ровной структурой соединения.

4. Разбивка модели на конечные элементы:

- форма конечных элементов матрицы и пуансона – трехгранная призма, заготовка – параллелепипед;
- количество конечных элементов – от 20 000 до 22 000 в зависимости от формы заготовки.

5. Задание параметров процесса: времени, глубины вытяжки и усилия прижима:

5.1. В реальности процесс вытяжки производят при скоростях движения инструмента не более 0,5 м/с. Так как, минимальный шаг интегрирования, определяемый условиями устойчивости решения при явных методах, обратно пропорционален скорости движения элемента, то для вычисления со скоростью 0,5 м/с мощности используемого процессора недостаточно, увеличиваем скорость движения пуансона в 5 раз. Тогда время перемещения пуансона с постоянной скоростью 2,5 м/с составит 0,016 с.

5.2. Глубина вытяжки (перемещения пуансона по оси Y) – 0,04 м.

5.3. По условиям процесса вытяжки удельная сила прижима составляет 2,5 МПа. С учетом того, что используется четверть полной модели, сила прижима в начале процесса вытяжки составляет 0,625 МПа. Прижим задается давлением на заготовку без изображения самого инструмента (прижимной плиты).

6. Задание параметров расчета. В качестве параметров для расчета выступают:

- 1) общая деформация (Total Deformation);
- 2) общая деформация по Мизесу (Equivalent Strain (von-Mises));
- 3) интенсивность деформаций (Intensity);
- 4) напряжение деформирования (Equivalent Stress);
- 5) интенсивность напряжений (Intensity Stress).

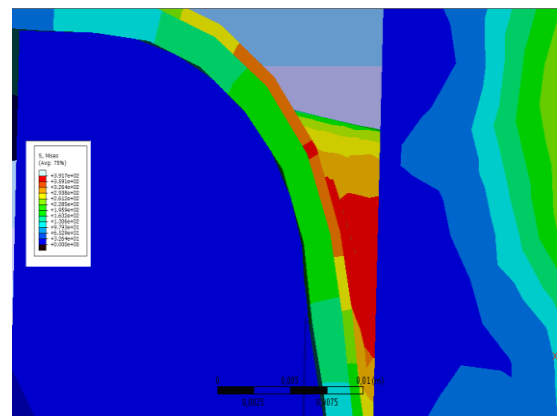
**Анализ полученных результатов.** Основные задачи компьютерного моделирования методом конечных элементов – установление влияния формы заготовки, расположения слоев металла, их толщины, а также геометрических параметров инструмента на усилие вытяжки, поле напряжений и деформаций, сравнение результатов моделирования с аналитическим расчетом и опытными данными.

Из зависимостей усилие деформирования – перемещение пуансона видно, что для заготовок с внутренним расположением слоя меди усилие деформирования в среднем на 8–10 % выше, чем для заготовок с внешним расположением слоя меди.

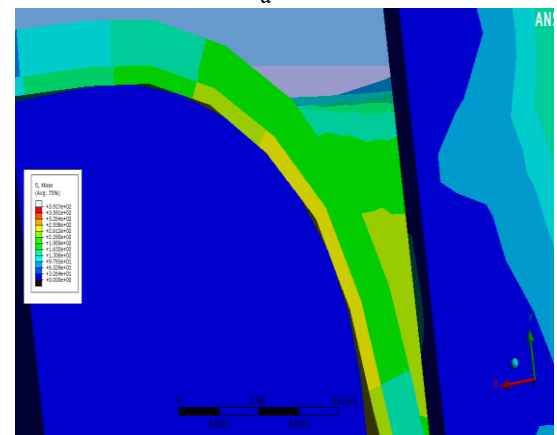
Это подтверждают построенные компьютерные модели вытяжки биметаллических

заготовок, на которых изображены интенсивности напряжений во всех точках построенного выреза, где на основании цветовой гаммы, каждый цвет в которой соответствует конкретной величине исследуемого параметра, определяемой по цветному столбику слева (см. рис. 4, а–б), видно, что интенсивности напряжений для заготовок с внутренним расположением слоя меди в среднем на 5–30% выше, чем для заготовок с внешним расположением слоя меди.

Как отчетливо видно из рисунков 4, а–б напряжения, которые возникают в слое меди (от 163 до 323 МПа и 163 до 260 МПа а) и б) соответственно) независимо от ее расположения, больше чем напряжения в слое алюминия (от 97 МПа до 130 МПа), напряженное состояние которого остается неизменным.



а



б

Рис. 4 – Схема, изображающая величину интенсивности напряжений в различных точках деформированной заготовки в зависимости от цветовой гаммы сечения детали (цветной столбик слева показывает величину интенсивности напряжений в зависимости от цвета): а – внутреннее расположение медного слоя, б – внешнее расположение медного слоя

Подобное расположение напряженных полей объясняется более высокими прочностными и меньшими пластическими способностями меди по

сравнению с алюминием. Так же данный факт показывает, что более твердый и прочный материал, для получения оптимальной технологичности изделия, должен располагаться на внешней части детали. В тоже время, желательнее при изготовлении биметаллических деталей вытяжкой подбирать, по возможности, материалы с примерно одинаковыми прочностными и пластическими характеристиками, что позволит избежать возникновения различных по величине напряжений в слоях изделия и соответственно избежать коробления или других негативных последствий для готового изделия.

Величина интенсивности возникающих напряжений и деформаций в материале детали зависит от формы заготовки, из которой ее изготавливают.

Как следует из теоретического анализа процессов вытяжки, форма заготовки оказывает влияние на напряженно-деформированное состояние в процессе формоизменения [5]. Для подтверждения этого положения моделировались различные варианты заготовки, и после расчета проводился сравнительный анализ результатов.

Внешнее расположение слоя меди при деформации увеличивает интенсивность напряжений от 260 МПа до 320 МПа, что соответствует физической сущности явлений, где трение между матрицей и заготовкой происходит по слою меди, для которой коэффициент сухого трения ниже, чем для алюминия (0,61 – для алюминия по стали, 0,22 – для меди по стали) [6, 7]. Вообще общая картина деформированного и напряженного состояния в полученной модели разделяется на две – для каждого слоя по отдельности, отсутствует зона переходного участка, так как при моделировании она должна выделяться в самостоятельный слой с задаваемыми физико-механическими характеристиками этого слоя.

Это усложнит модель, увеличит время счета и нагрузку на процессор. При этом недостаточно выявлены механические характеристики зоны соединения металлов, что затрудняет проектирование конечно-элементной модели.

Полученные результаты усредняли для каждого случая и сводили в табл. 1.

Таблица 1 – Сводная таблица результатов конечно-элементного моделирования процесса вытяжки биметалла

Элементы НДС						
для внутреннего расположения меди						
$\sigma_i/\text{МПа}$	315	313	300	300	315	315
$\varepsilon_i$	0,67	0,65	0,62	0,65	0,56	0,67
для внешнего расположения меди						
$\sigma_i/\text{МПа}$	280	282	250	260	265	270
$\varepsilon_i$	0,63	0,59	0,59	0,63	0,56	0,61

На основании вышеперечисленного, а также, ориентируясь по моделям деформируемого состояния при получении коробчатых деталей и листового биметалла алюминий медь, можно сделать вывод, что оптимальной формой для заготовки является «прямоугольник со срезанными углами» и внешним расположением слоя меди. Данная форма заготовки обеспечивает отсутствие гофра, при однопереходной вытяжке коробчатых деталей из биметалла алюминий-медь, а также обеспечивает наименьшее потребное усилие деформирования и минимальные интенсивности напряжений и деформаций.

**Выводы.** На основании метода конечных элементов смоделированы процессы вытяжки из биметалла алюминий-медь коробчатых деталей для различных типов заготовок. При моделировании использованы различные комбинации слоев материала, что позволяет судить о влиянии

расположения слоев материала и формы заготовки на параметры процесса.

Интенсивность напряжений наибольшая на радиусе закругления пуансона и достигает 350 МПа для слоя меди и 260 МПа для слоя алюминия; слой меди необходимо располагать к матрице, если это допускают условия изготовления, это снижает интенсивность напряжений в слое меди с 315 МПа до 250 МПа; применяемая заготовка – прямоугольник со скошенными краями, уменьшаются наибольшие напряжения и интенсивности деформаций с 315 МПа до 300 МПа, с 0,67 до 0,65 для внутреннего расположения меди и с 282 МПа до 250 МПа, с 0,63 до 0,59 для внешнего расположения меди; с увеличением глубины вытяжки растут как интенсивности напряжений, так и интенсивности деформаций (при глубине проштамповки 0,02 м  $\varepsilon_i=0,3-0,375$ ;  $\sigma_i=200-$

230 МПа; при глибині 0,04 м  $\varepsilon_i = 0,56-0,67$ ;  $\sigma_i = 300-315$  МПа).

#### Список литературы

1. Романовский В. П. Справочник по холодной штамповке / В. П. Романовский. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отделение, 1976. – 520 с.
2. Стеблюк В. І. Побудова контуру заготовки на основі математичної моделі процесу витягування порожнистих виробів коробчастої форми / В. І. Стеблюк, О. В. Холявік // Сб. научн. трудов “Обработка материалов давлением”, Краматорск. 2009 – №1 (20). – С. 63–67.
3. Губкин С. И. Теория обработки металлов давлением / С. И. Губкин. – М.: Государственное научно-техническое издательство литературы по черной и цветной металлургии, 1959. – 569 с.
4. Шофман Л. А. Теория и расчеты процессов холодной штамповки / Л. А. Шофман. – М.: Машиностроение, 1964. – 375 с.
5. Маслов В. Е., Экспериментальное исследование процессов обработки металлов давлением / В.Е. Маслов, В. Н. Шаповал. – К.: Вища школа, 1983. – 231 с.
6. Пригоровский Н. И. Методы и средства определения полей деформаций и напряжений: Справочник / Н. И. Пригоровский. – М.: Машиностроение, 1983. – 248 с.
7. Адлер Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – М.: Наука, 1971. – 279 с.

#### References (transliterated)

1. Romanovskiy V. P. *Spravochnik po kholodnoy shtampovke* [Handbook of cold stamping]. Leningrad.: Mashinostroenie. Leningr. otделение, 1976. – 520 p.
2. Steblyuk V. I. *Pobudova konturu zagotovki na osnovi matematichnoyi modeli protsesu vityaguvannya porozhnistikh virobiv korobchastoï formi* // Sb. nauchn. trudov “Obrabotka materialov davleniem”, Kramatorsk. – 2009 – No 1 (20). – pp. 63–67.
3. Gubkin S. I. *Teoriya obrabotki metallov davleniem* [Theory of metal forming]. Moscow: Gosudarstvennoe nauchno-tekhnicheskoe izdatel'stvo literatury po chernoy i tsvetnoy metallurgii, 1959. – 569 p.
4. Shofman L. A. *Teoriya i raschety protsessov kholodnoy shtampovki* [Theory and calculations of cold forming processes]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1964. – 375 p.
5. Maslov V. E., *Eksperimental'noe issledovanie protsessov obrabotki metallov davleniem* [Experimental investigation of metal forming processes]. – Kiev: Vishcha shkola Publ., 1983. – 231 p.
6. Prigorovskiy N. I. *Metody i sredstva opredeleniya polye deformatsiy i napryazheniy: Spravochnik* [Methods and means for determining the strain and stress fields]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1983. – 248 p.
7. Adler Yu. P. *Planirovanie eksperimenta pri poiske optimal'nykh usloviy* [Planning an experiment in the search for optimal conditions]. Moscow: Nauka Publ., 1971. – 279 p.

Поступила (received) 07.11.2016

#### Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

**Конечно-элементная модель деформирования биметаллической заготовки при получении вытяжкой коробчатых деталей / Т. В. Гайкова** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – № 30(1202). – С. 21–25. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2519-2671

**Кінцево-елементна модель деформування біметалічної заготовки при отриманні витяжкою коробчатих деталей / Т. В. Гайкова** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – № 30(1202). – С. 21–25. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2519-2671

**Certainly-element model of deformation of bimetallic purveyance at a receipt by extraction of box-type details / Т. V. Haikova** // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy. – Kharkiv: NTU «KhPI» – 2016. – No 30 (1202). – P. 21–25. – Bibliogr.: 7 – ISSN 2519-2671

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Гайкова Татяна Владиславівна** – кандидат технічних наук, Кременчугський національний університет імені Михайла Остроградського, доцент кафедри технології машиностроєння; тел.: (097) 514-10-62; e-mail: tanyahaikova@mail.ru

**Гайкова Тетяна Владиславівна** – кандидат технічних наук, Кременчугський національний університет імені Михайла Остроградського, доцент кафедри технології машинобудування; тел.: (097) 514-10-62; e-mail: tanyahaikova@mail.ru

**Haikova Tetiana Vladyslavivna** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Associate Professor of mechanical engineering technology; tel.: (097) 514-10-62; e-mail: tanyahaikova@mail.ru

УДК 621.777.4

**В. М. ГОРНОСТАЙ; С. Ф. САБОЛ, А. М. ПОТЯТИНИК**

### ТЕПЛОВИЙ ЕФЕКТ ПРИ ХОЛОДНОМУ ВИДАВЛЮВАННІ ПОРОЖНИСТИХ ВИРОБІВ

Розглянуто тепловий ефект при холодному видавлюванні порожнистих виробів та його вплив на температуру робочого інструменту. Проведено чисельні експерименти з використанням методу скінчених елементів в програмному комплексі DEFORM 3D, що дозволило визначити залежність зміни температури заготовки, робочого інструменту від ступеня деформування. Визначено залежність зусилля виймання пуансону та виштовхування. Для експериментального дослідження було спроектовано та виготовлено технологічне оснащення. Представлено результати експериментального визначення залежності зміни температури робочого інструменту при холодному видавлюванні порожнистих виробів.

**Ключові слова:** холодне видавлювання; тепловий ефект, температура на робочому інструменті, розподіл температури по об'єму заготовки, зусилля виймання пуансону, зусилля виштовхування.

Рассмотрен тепловой эффект при холодном выдавливании полых изделий и его влияние на температуру рабочего инструмента. Проведены численные эксперименты с использованием метода конечных элементов в программном комплексе DEFORM 3d, что позволило определить зависимость изменения температуры заготовки, рабочего инструмента от степени деформации. Определено усилие извлечения пуансона из заготовки и выталкивания. Для экспериментальных исследований было спроектирована и изготовлена технологическая оснастка. Построены экспериментальные зависимости изменения температуры рабочего инструмента при холодном выдавливании полых деталей.

**Ключевые слова:** холодное выдавливание, тепловой эффект, температура деформирующего инструмента, распределение температуры по объёму заготовки, усилие извлечения пуансона, усилие выталкивания.

Processes cold die forging have several advantages, which allow for high-quality products with high material use 97%, and in some cases up to 100%. But these processes are characterized by significant specific stress on deforming tool and heat as a result of plastic deformation. If specific stress acting on the tool in many research works, the data related to the definition of thermal effects in the process of cold die forging and its influence on deforming tool and directly determine the temperature distribution in the volume of blanks available. Therefore, the results of theoretical and experimental studies to determine the thermal effect and its impact on deforming tools presented in this paper are relevant. Numerical experiments using a finite element software complex DEFORM 3D, allowing to fully explore the process of reverse hollow extrusion products ranging from extrusion cavity and ending pushing blank matrix. Theoretical by the temperature distribution in the volume of blanks and experimentally determined maximum temperature of the workpiece and punch temperature dependence of the number of transactions. Reviewed by thermal effect of cold extrusion of hollow articles and its influence on the temperature of the working tool. Numerical experiments have been conducted using the finite element method in the program complex DEFORM 3d, which allowed to determine the dependence of the temperature change of the tool from the workpiece deformation degree. Determined effort to plug retrieval of workpiece and push. For pilot studies were designed and manufactured tooling. Built the experimental dependence of temperature change a working tool in cold extrusion of hollow parts.

**Keywords:** cold extrusion, thermal effect, the temperature of the deforming tool distribution volume preform temperature, extraction force of the punch, ejection force.

**Вступ.** Процеси холодного об'ємного штампування мають ряд переваг [1–2], що дозволяють отримувати високоякісні вироби з високим коефіцієнтом використання матеріалу 97%, а в деяких випадках і до 100%. Але ці процеси характеризуються значними питомими напруженнями на деформуючому інструменті та виділенням тепла в результаті пластичного деформування. Якщо питомі напруження, що діють на інструменті дослідженні в багатьох роботах, то дані пов'язані з визначенням теплового ефекту в процесах холодного об'ємного штампування та його впливу на деформуючий інструмент та безпосередньо визначенню розподілу температури в об'ємі заготовки відсутні. Тому результати теоретичних та експериментальних досліджень по визначенню теплового ефекту та його впливу на деформуючий інструмент наведені в даній роботі є актуальними.

**Постановка задачі.** На рис. 1 показано ескіз деталі (в силу симетрії виробу наведено половину деталі) для якої необхідно отримати заготовку холодним зворотнім видавлюванням та визначити розподіл температури по об'єму заготовки. Схема процесу видавлювання зображено на рис. 2а. Ліворуч

від осі показано у вихідному стані, а праворуч – кінцевому. Заготовка 2 встановлюється в контейнер 1. В донній частині контейнера встановлений виштовхувач 4. Видавлювання заготовки виконується пуансоном 3. Вихідні розміри заготовки визначали з умови постійності об'ємів. Дана заготовка, вихідні розміри якої зведені в табл. 1, виготовляється із сталі 15 з наступними властивостями: модуль Юнга  $2,1 \cdot 10^5$  МПа, коефіцієнт Пуассона 0,3, умовна межа течії  $\sigma_{0,2} = 230$  МПа. Задача вирішується в пружно-пластичній постановці. Початкова температура заготовки та робочого інструменту задається  $20^\circ\text{C}$ .

Таблиця 1 – Розміри кінцевого виробу

$\varepsilon, \%$	$D_n, \text{мм}$	$D_3, \text{мм}$	$H_3, \text{мм}$	$\alpha, \text{град}$	$H, \text{мм}$
10	19	60	50	7	55
20	27				60
30	33				66,8
40	38				75,8
50	42				86,8
60	46				103,9

Чисельним моделюванням, за допомогою методу скінчених елементів (МСЕ) в програмному

комплексі DEFORM-3D проведено теоретичний аналіз процесу холодного видавлювання заготовки діаметром  $D_3 = 60$  мм та висотою  $H_3 = 50$  мм з різною ступеню деформації. Моделювання виконували в пружно-пластичній постановці з врахуванням розвантаження. Теоретичний аналіз МСЕ дозволяє встановити напружено-деформований стан в об'ємі заготовки, кінцеві розміри виробу з урахуванням пружної деформації, а також отримати розподіл нормальних напружень на контактуючих поверхнях заготовки з інструментом, що дозволяє розраховувати інструмент на міцність та визначити

розподіл температури по об'єму заготовки. Процес моделювався с вихідного стану заготовки (рис. 2а ліва частина) далі видавлювалась порожнина з урахуванням температури, швидкість переміщення пуансона складала 2 мм/с, що відповідає гідралічному пресу ДБ 2432, коефіцієнт тертя  $\mu = 0,08$ . Другим етапом (рис. 2б) моделювалося виймання пуансона з заготовки з урахуванням температури та на третьому етапі (рис. 2в) моделювалося виштовхування заготовки та визначався розподіл температури по об'єму заготовки.

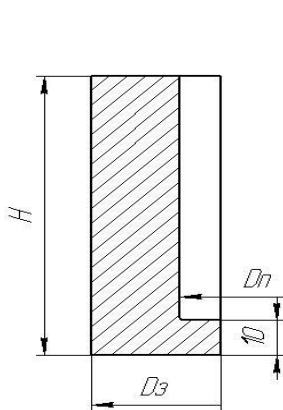
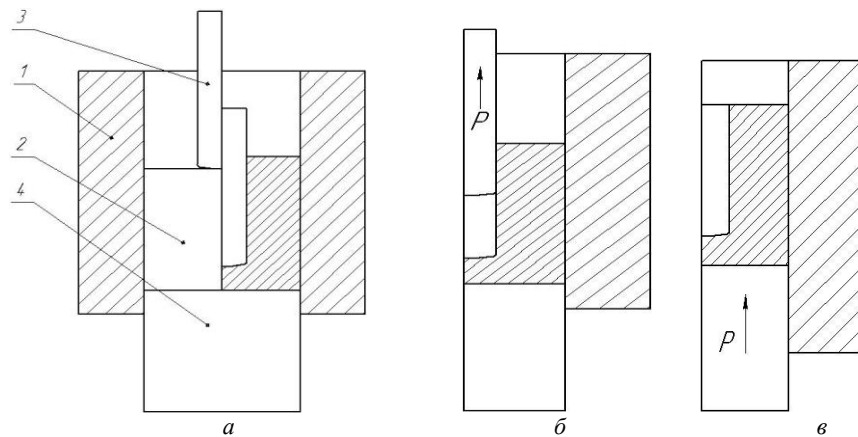


Рис. 1 – Ескіз деталі

Рис. 2 – Етапи холодного зворотного видавлювання порожнистого виробу:  
а – видавлювання, б – виймання пуансона, в – виштовхування заготовки

### Результати чисельних експериментів.

В результаті чисельних експериментів було отримані залежності зусилля (рис. 3) видавлювання, виймання пуансону та виштовхування заготовки з матриці. Максимальне зусилля видавлювання склало 420 кН при деформуванні з ступенем деформації 60%. Треба сказати що максимальне зусилля виймання пуансону складає 10% від зусилля видавлювання. При

виштовхування заготовки з матриці максимальне зусилля виштовхування спостерігається при мінімальному ступені деформуванні  $\varepsilon = 10\%$  та склало 22 кН що складає 30% від зусилля видавлювання, але при збільшенні ступеня деформації зусилля виштовхування зменшується та складає 5% від зусилля видавлювання. При  $\varepsilon = 60\%$  зусилля виштовхування склало 18 кН.

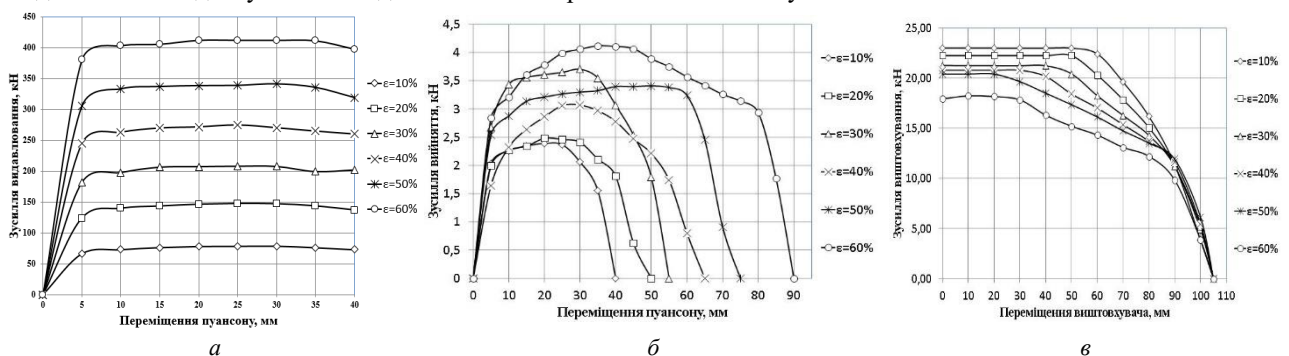


Рис. 3 – Залежності зусилля: а – видавлювання, б – виймання пуансону та в – виштовхування заготовки

На рис. 4 приведені розподіли інтенсивності напружень  $\sigma_i$  по об'єму здеформованої заготовки. По розподілу  $\sigma_i$  в об'ємі заготовки ми маємо можливість

оцінити зміцнення матеріалу за рахунок холодної пластичної деформації. Максимальні значення



складають 740 МПа у донній частини заготовки, у стінці максимальне значення складає 400 МПа.

Розподіли інтенсивності деформацій  $\epsilon_i$  по об'єму здеформованої заготовки представлено на рис. 5.

Розподіл  $\epsilon_i$  характеризує пропрацювання структури матеріалу

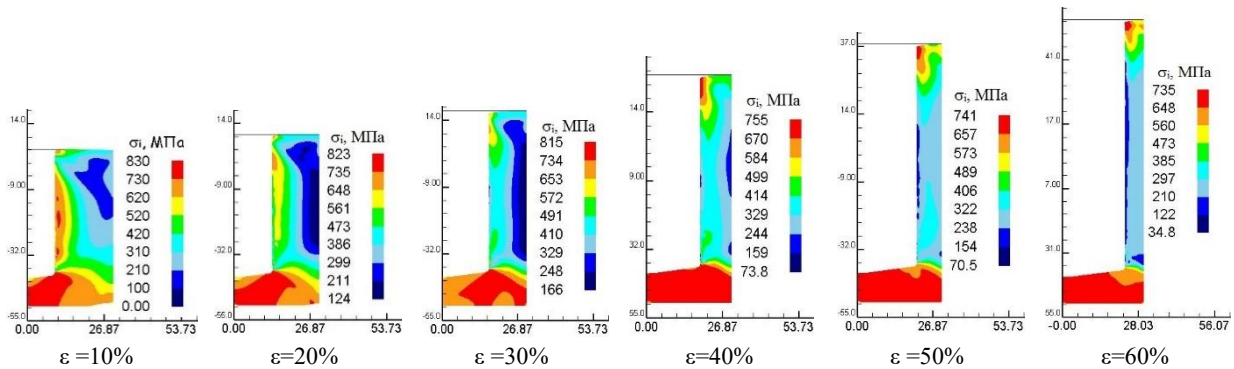


Рис. 4 – Розподіл інтенсивності напружень  $\sigma_i$  по об'єму заготовки

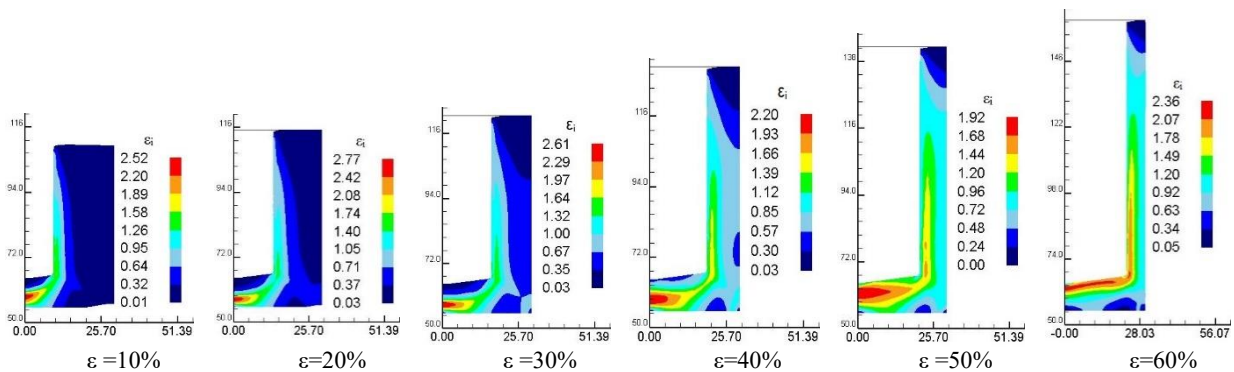


Рис. 5 – Розподіл інтенсивності деформацій  $\epsilon_i$  по об'єму заготовки

Аналізуючи цей розподіл треба сказати що збільшення ступеня деформації дозволяє більш рівномірно пропрацювати як стінку заготовки так і донну частину, в той час як при малих ступенях деформації пропрацьовуються тільки внутрішні шари порожнини.

На рис. 6 показано розподіл використання ресурсу пластичності по об'єму заготовки. Треба

відмітити що при деформуванні з даними ступенями деформації руйнування матеріалу не спостерігається. Максимальне значення спостерігається на внутрішньому торці стінки заготовки. Це підтверджує можливість формоутворення виробу без руйнування.

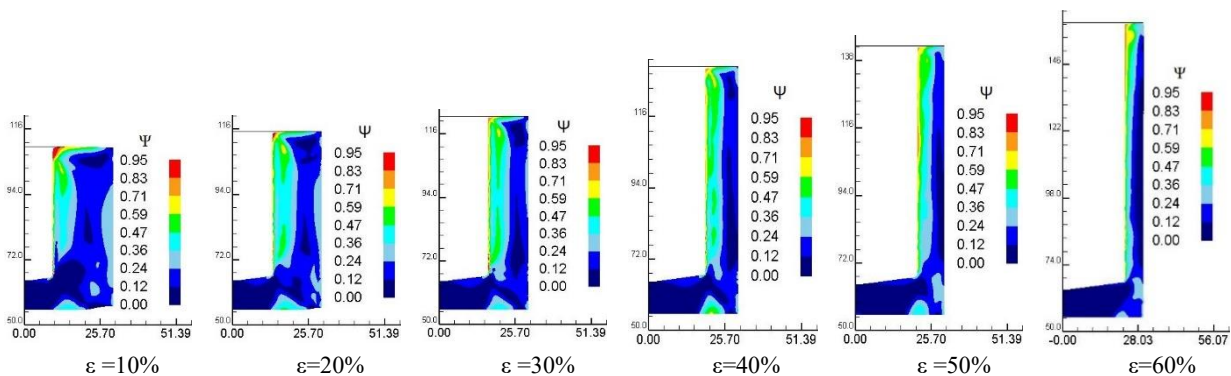


Рис. 6 – Розподіл використання ресурсу пластичності  $\psi$  по об'єму заготовки

На рис. 7 приведено розподіли температури по об'єму заготовки. З якого видно що збільшення ступеня деформації призводить до більш інтенсивного виділення тепла як під пуансоном так і в стінці виробу. Максимальна температура розігріву

заготовки складає  $400^{\circ}\text{C}$ . Осередок інтенсивного розігріву спостерігається в зовнішній донній частині заготовки що пояснюється значними напруженнями зсуву між недеформуємою частиною заготовки та зоною інтенсивної течії матеріалу в стінку заготовки.

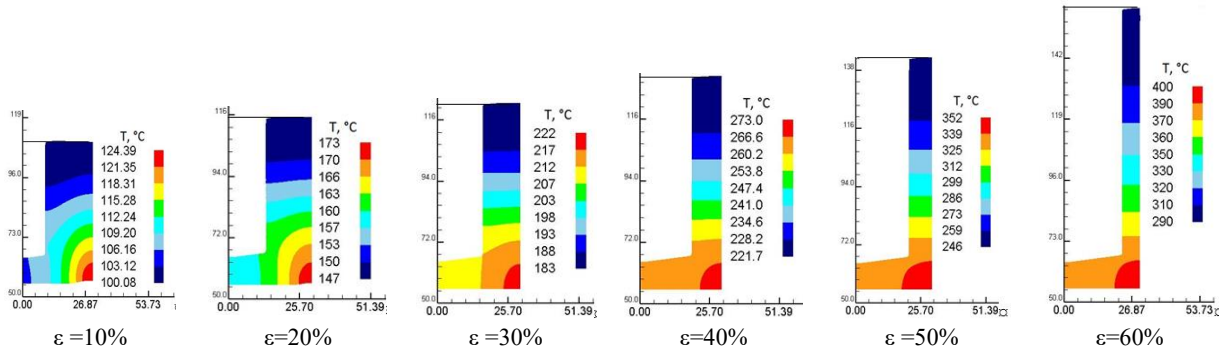


Рис. 7 – Розподіл температури по об'єму заготовки

По отриманим результатам було спроектовано конструкцію штампного оснащення для проведення експериментальних досліджень. Схема штампа представлена на рис. 8. Бандажована матриця 1 встановлюється на підкладну плиту 3. Підкладна плита 3 встановлюється на опорну плиту 5. Матриця 1 кріпиться до підкладної плити за допомогою фіксуючого кільця 4, що фіксується до опорної плити гвинтами 26. Опорна плита фіксується до нижньої плити штампу 12 за допомогою гвинтів 28. В отворі опорної плити розташована підкладна плита 6, на якій встановлений виштовхувач 2. Пуансон 7 встановлюється на підкладну плиту 11 за допомогою направляючого кільця 9, що фіксується до верхньої плити за допомогою фіксуючого кільця 8, що кріпиться гвинтами 24 до набірної кільця 10, що в свою чергу кріпиться до верхньої плити 13 за допомогою гвинтів 23.

Для направлення руху верхньої плити 13 відносно нижньої плити 12 передбачені направляючі колонки 19, 20 та направляючі втулки 21, 22. Направляючі колонки 19, 20 запресовані у нижню плиту 12, а направляючі втулки 21, 22 – у верхню плиту 13.

Для виймання готового виробу із матриці передбачено тяговий механізм, що знаходиться у

нижній половині штампу. В отворі підкладної плити 18 розташоване коромисло 16, яке при ході верхньої плити 13 вгору за допомогою тяги 17 передає рух вгору через привід виштовхувача 15, що ходить в направляючій втулці 14 і передає рух на підкладну плиту 6.

У верхньому положенні повзуна пресу пуансон 7 знаходиться у крайньому верхньому положенні над робочою зоною. В робочу зону подається заготовка, здійснюється робочий хід і відбувається видавлювання заготовки. Хід повзуна завершується в його верхньому положенні. Деталь видаляється за допомогою виштовхувального механізму і відбувається під час ходу повзуна вгору.

Залежність температури заготовки від ступеня деформації представлено на рис. 9а. З якої видно що при збільшенні ступеня деформації збільшується температура виробу. Експериментальне максимальне значення температури виробу ( $\epsilon = 55\%$ ) визначалася після штампування 200 штук за допомогою пірометра FLUS «IR-828» та склала  $430^{\circ}\text{C}$  в зовнішній донній частині виробу. Експериментальна залежність розігріву пуансону показано на рис. 9б. Максимальна температура пуансону склала  $200^{\circ}\text{C}$  після штампування 500 штук заготовок. Це призводить до температурного розширення та збільшення розміру порожнини що отримується.



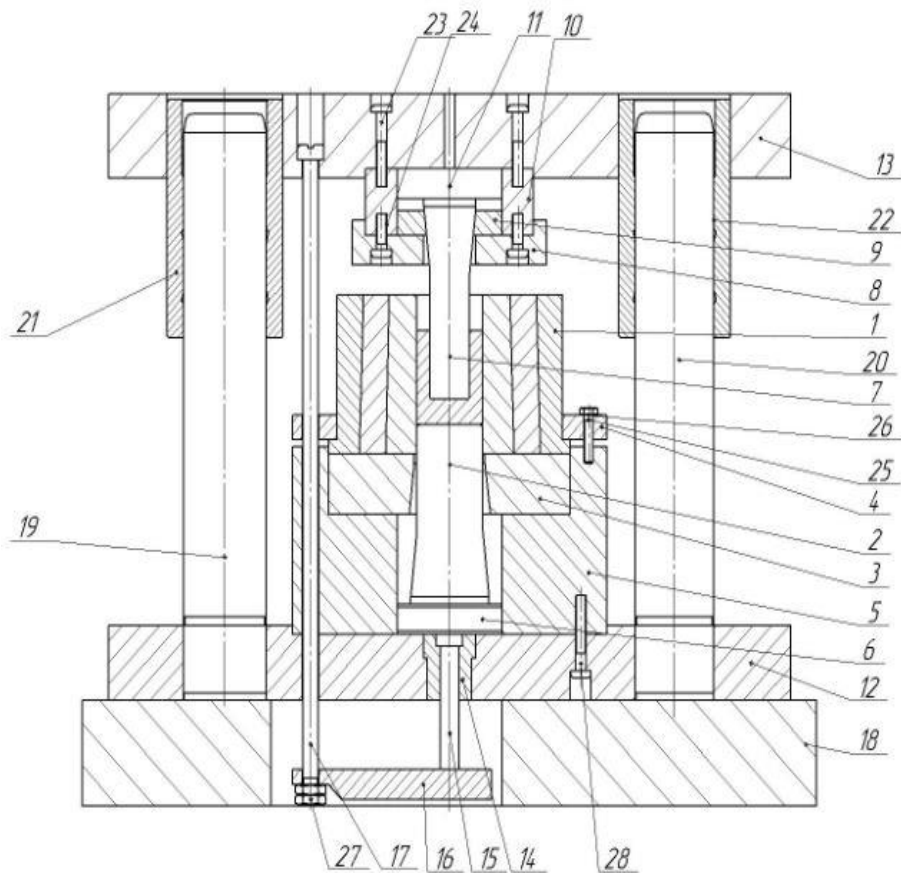
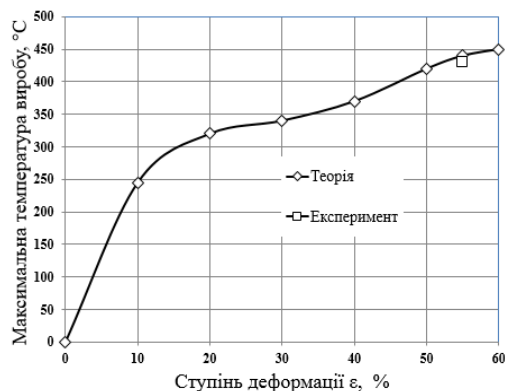


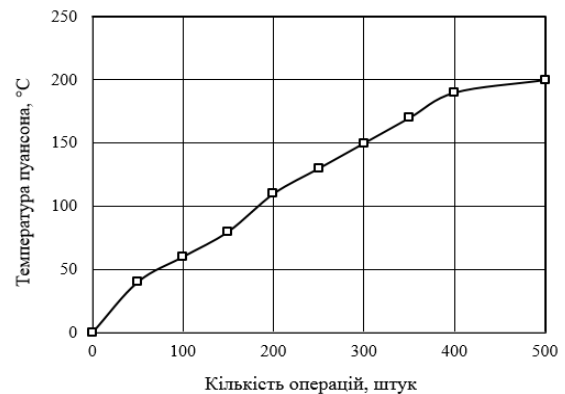
Рис. 8 – Схема штамп для холодного зворотнього видавлювання порожнистих виробів

Рекомендується після отримання 200–250 штук виробів проводити перерву для охолодження робочого інструменту, або використовувати

примусове охолодження. При малих ступенях деформування кількість операцій може бути збільшена в 2 рази.



а



б

Рис. 9 – Залежності температури кінцевого виробу: а – від ступеня деформації та б – температури пуансона від кількості операцій

### Висновки:

1. Проведено чисельні експерименти з використанням методу скінченних елементів в програмному комплексі DEFORM 3D, що дозволило

всебічно дослідити процес зворотнього видавлювання порожнистих виробів починаючи з видавлювання порожнини і закінчуючи виштовхуванням заготовки матриці.

2. Визначено теоретичним шляхом розподіл температури в об'ємі заготовки та експериментально визначено максимальну температуру заготовки і залежність температури пуансону від кількості операцій.

#### Список літератури

1. Холодная объемная штамповка. Справочник. / Под ред. Г.А. Навроцкого. – Москва. Машиностроение, 1973, – 496 с.
2. Ковка и штамповка. Справочник. В 4-х т.; т. 3. Холодная объемная штамповка / Под ред. Г.А. Навроцкого. – Москва: Машиностроение, 1987. – 384 с.
3. Третьяков А.В. Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением / А.В. Третьяков, В.И. Зюзин // 2-е изд. – Москва: Металлургия, 1973 – 224 с.
4. Deform-3D – мощная система моделирования технологических процессов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.thesis.com.ru/software/deform>.

#### References (transliterated)

1. *Holodnaya ob'emnaya shtampovka*. Spravochnik. / Pod red. G.A. Navrotskogo. [Cold volume stamping]. Moscow, Mashinostroenie, Publ., 1973. – 496 p.
2. *Kovka i shtampovka*. Spravochnik. Vol. 3. Holodnaya ob'emnaya shtampovka / Pod red. G.A. Navrotskogo [Forging and Stamping]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1987. – 384 p.
3. Tretyakov A.V. *Mekhanicheskie svoystva metallov i splavov pri obrabotke davleniem* [The mechanical properties of metals and alloys by pressure treatment]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1973 – 224 p.
4. Deform-3D – moschnaya sistema modelirovaniya tehnologicheskikh protsessov [Elektronnyy resurs]. – Rezhim dostupa: <http://www.thesis.com.ru/software/deform>

Надійшла (received) 10.11.2016

#### Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

**Тепловий ефект при холодному видавлюванні порожнистих виробів / В. М. Горностай, С. Ф. Сабол, А. М. Потятиник** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – № 30(1202). – С. 26–31. – Бібліогр.: 4 назви. – ISSN 2519-2671

**Тепловой эффект при холодном выдавливании полых изделий / В. Н. Горностай, С. Ф. Сабол, А. Н. Потятиник** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – № 30(1202). – С. 26–31. – Бібліогр.: 4 назви. – ISSN 2519-2671

**Thermal effect of cold extrusion of hollow articles / V. M. Hornostai, S. F. Sabol, A. M. Potiatynyk** // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy. – Kharkiv: NTU «KhPI» – 2016. – No 30 (1202). – P. 26–31. – Bibliogr.: 4 – ISSN 2519-2671

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Горностай Вадим Миколайович** – кандидат технічних наук, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», доцент кафедри механіки пластичності матеріалів та ресурсозберігаючих процесів; тел.: (050) 5358653; e-mail: [w.gornostay@kpi.ua](mailto:w.gornostay@kpi.ua)

**Горностай Вадим Николаевич** – кандидат технических наук, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского», доцент кафедры механики пластичности материалов и ресурсосберегающих процессов; тел.: (050) 5358653; e-mail: [w.gornostay@kpi.ua](mailto:w.gornostay@kpi.ua)

**Hornostai Vadym Mykolaiovych** – candidate of technical sciences, National Technical University of Ukraine "Kiev Polytechnic Institute named Igor Sikorsky", Associate Professor of the Department of Mechanics of plasticity of materials and resource saving processes; tel.: (050) 5358653; e-mail: [w.gornostay@kpi.ua](mailto:w.gornostay@kpi.ua)

**Сабол Сергій Францевич** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», доцент кафедри механіки пластичності матеріалів та ресурсозберігаючих процесів; тел.: (050) 7193026; e-mail: [s.sabol@kpi.ua](mailto:s.sabol@kpi.ua)

**Сабол Сергей Францевич** – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского», доцент кафедры механики пластичности материалов и ресурсосберегающих процессов; тел.: (050) 7193026; e-mail: [s.sabol@kpi.ua](mailto:s.sabol@kpi.ua)

**Sabol Serhii Frantsevych** – candidate of technical sciences, Associate Professor, National Technical University of Ukraine "Kiev Polytechnic Institute named Igor Sikorsky", Associate Professor of the Department of Mechanics of plasticity of materials and resource saving processes; tel.: (050) 7193026; e-mail: [s.sabol@kpi.ua](mailto:s.sabol@kpi.ua)

**Потятиник Андрій Миколайович** – аспірант, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», тел.: (095) 3671932

**Потятиник Андрей Николаевич** – аспірант, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского», тел.: (095) 3671932

**Potiatynyk Andrii Mykolaiovych** – fellow, National Technical University of Ukraine "Kiev Polytechnic Institute named Igor Sikorsky", tel.: (095) 3671932

УДК 621.77

Е. Д. ГРОЗЕНКО, Э. А. СИМСОН, А. В. СТЕПУК, С. Ю. ШЕРГИН

**ВЛИЯНИЕ ТРЕНИЯ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВОЛОКНИСТОЙ СТРУКТУРЫ ПОКОВКИ ПОДШИПНИКОВОГО КОЛЬЦА ПРИ ГОРЯЧЕЙ ШТАМПОВКЕ**

Проведено чисельне моделювання технологічного процесу гарячого штампування підшипникового кільця. Досліджено вплив фактора тертя на контактних поверхнях на розподіл волокнистої структури поковки підшипникового кільця, отриманої двоетапним способом формування. Задача представлена у вигляді нестационарної контактної термовязкопластичної задачі з відповідними граничними умовами, рішення якої здійснюється методом скінченних елементів. Картина розподілу волокнистої структури матеріалу у вигляді ліній Лагранжа була отримана шляхом розрахунку параметрів напружено-деформованого стану попередньо нагрітої циліндричної заготовки в процесі осадки і формування. Проведено порівняння картин розподілу ліній Лагранжа для трьох типів тертя на контактних поверхнях: сухого, комбінованого і тертя з мастилом. Аналіз результатів дозволяє вибрати комбіноване тертя як варіант умов тертя, що забезпечує мінімальні кути виходу ліній Лагранжа на контактну поверхню (качання) поковки. Отримана волокниста структура матеріалу поковки дає можливість прогнозувати підвищення надійності і довговічності готового виробу – підшипникового кільця.

**Ключові слова:** підшипникове кільце, волокниста структура, поковка, штамповка, термовязкопластична задача, тертя, довговічність.

Проведено численное моделирование технологического процесса горячей штамповки подшипникового кольца. Исследовано влияние фактора трения на контактных поверхностях на распределение волокнистой структуры в поковке подшипникового кольца, полученной двухэтапным способом формовки. Задача представлена в виде нестационарной контактной термовязкопластической задачи с соответствующими граничными условиями, решение которой осуществляется методом конечных элементов. Картина распределения волокнистой структуры материала в виде линий Лагранжа была получена путем расчета параметров напряженно-деформированного состояния предварительно нагретой цилиндрической заготовки в процессе осадки и формовки. Проведено сравнение картин распределения линий Лагранжа для трех типов трения на контактных поверхностях: сухого, комбинированного и трения со смазкой. Анализ результатов позволяет выбрать комбинированный вид трения как вариант условий трения, обеспечивающий минимальные углы выхода линий Лагранжа на контактную поверхность (качания) поковки. Полученная волокнистая структура материала поковки дает возможность прогнозировать повышение надежности и долговечности готового изделия – подшипникового кольца.

**Ключевые слова:** подшипниковое кольцо, волокнистая структура, поковка, штамповка, термовязкопластическая задача, трение, долговечность.

The paper presents numerical simulation of the bearing rings' hot forming process. The friction factor of the contact surfaces affects the fibrous structure in the forging-bearing ring made with the two-step molding process. The problem examined in the form of non-stationary contact thermo viscous plastic tasks and relevant boundary conditions. Its solution found with the finite element method. The pattern of the material fibrous distribution structure in the form of Lagrange lines was obtained by calculating the parameters of the stress-strain state for the pre-heated cylindrical work piece during precipitation and molding. The Lagrange lines distribution patterns for the three types of the contact surfaces friction terms compared to: dry, lubricated friction and the combined ones. The results' analysis allowed selecting the friction combined type as the best option of the friction conditions to provide minimum output Lagrange lines' angles on the contact surface during forging or rolling. The fibrous structure of the forging material makes it possible to predict the increase of reliability and durability for the finished product, i.e. bearing ring.

**Keywords:** bearing ring, fibrous structure, forging, forming, thermo viscous plastic problem, friction, durability.

**Введение и анализ последних исследований.**

В современном машиностроении при крупносерийном производстве для изготовления заготовок ответственных деталей машин широко применяются метод обработки металлов давлением, при котором пластическое деформирование металла приводит к его изменению механических свойств и структуры. Управляя параметрами технологического процесса можно получить прогнозируемое качество деталей. Примером такого технологического процесса является процесс горячей штамповки заготовок подшипниковых колец. Известно, что для повышения надежности и срока службы подшипникового кольца при проектировании процесса объемной штамповки необходимо обеспечить характерное волокнистое строение изготавливаемой поковки [1]. Многочисленные исследования показали, что оптимальное распределение волокон в материале деталей относительно рабочей контактной поверхности является определяющим фактором для повышения стойкости на истирание и долговечности деталей машин [1–3]. Экспериментально было получено, что контактная выносливость для

подшипниковых колец зависит от величины углов выхода волокна на контактную поверхность в зоне максимального нагружения. В работе [2] приведен график зависимости долговечности от величины угла выхода волокна на контактную поверхность. Максимальная долговечность отмечается для материала с волокнами параллельными дорожке качения. Прогнозирование характера распределения волокнистой структуры повок с учетом влияния различных факторов, таких как трение, скорость деформирования, температура является актуальной задачей.

Особенностью технологии горячей штамповки является значительное перемещение металла заготовки относительно рабочих поверхностей штампа при изготовлении поковки подшипникового кольца. Условия трения на контактных поверхностях пуансон-заготовка и заготовка -матрица определяют эффективность процесса формовки, т.к. трение приводит к увеличению неоднородности деформирования. При контактном взаимодействии инструмента и заготовки трение обуславливает контактные усилия и качество поверхности поковки.

Моделирование трения при исследовании процесса горячей штамповки рассматривается многими специалистами как важнейшая задача при имитационном моделировании соответствующей технологической операции [3–5]. Модель трения в идеале должна включать величину нормального давления, температуру, сопротивление срезу, скорость скольжения (учет смазки), качество контактирующих поверхностей (шероховатость поверхностей инструмента и заготовки, их адгезионные свойства, наличие окисных пленок, наличие покрытий или смазки). Так в работе Чумаченко Е.Н. [5] представлен сравнительный анализ моделей трения Кулона – Амонта, Леванова и Колмогорова, Ньютона, Зибеля. Экспериментальные исследования усилий при выдавливании цилиндрической заготовки показали хорошее совпадение с расчетными для модели трения Леванова [3] в широком диапазоне скоростей деформирования. С ростом скорости деформаций происходит увеличение влияния трения при деформировании металла [4]. Нагрев пластически деформируемого металла также влияет на фактор трения, которое уменьшается при ее повышении.

Особый интерес представляет исследование влияния фактора трения и на характер распределения волокнистой структуры материала в поковке, полученной в процессе горячей штамповки. Использование современных программных комплексов позволяет проведение математического моделирования технологического процесса изготовления поковки подшипникового кольца и дает возможность прогнозировать распределение волокнистой структуры, выбрать рациональные параметры процесса горячей штамповки. При формообразовании кольца из разогретой цилиндрической заготовки на этапе формовки можно получить поковки с улучшенными прочностными характеристиками рабочих поверхностей. Оптимальный подбор технологических параметров на стадии проектирования обеспечивает повышение качества и долговечности готовых колец подшипника.

**Целью** статьи является исследование влияния величины трения на распределение волокон в поковке кольца подшипника, получаемой горячей штамповкой.

**Постановка задачи и численная реализация.** Процесс горячей штамповки подшипникового кольца включает в себя следующие технологические операции: осадка, формовка и прошивка. В работе рассматривается процесс деформирования предварительно нагретой цилиндрической стальной заготовки при операциях осадки и двухпроходной формовки для получения поковки кольца подшипника.

Математическая модель, которая описывает все этапы технологического процесса горячей штамповки кольца подшипника, включает в себя уравнения равновесия, неразрывности, пластичности Мизеса и нелинейные соотношения между напряжениями, температурой и скоростями деформаций [6]. В связи с

высоким уровнем температур (1150° С) характерного для данного процесса штамповки, считается, что все механические свойства и прочностные характеристики металла зависят от температуры. При решении нестационарной контактной термовязкопластической задачи с соответствующими начальными и граничными условиями определяются параметры напряженно-деформированного состояния предварительно нагретой цилиндрической заготовки и картины распределения волокнистой структуры материала в виде линий Лагранжа. Для определения начального температурного поля цилиндрической заготовки, индукционно нагреваемой, решалась нестационарная краевая задача электромагнитного поля и теплопроводности с учетом фазовых переходов в металле, наличием объемных источников тепла и учетом зависимости термоэлектромагнитных характеристик от температуры [7]. На контактных поверхностях пуансон-заготовка и заготовка-матрица задавались условия теплового контакта и трение, изменяющиеся по закону Зибеля. Граничные условия для перемещений матрицы с внешней стороны – жесткое закрепление. Нагружение кинематическое – движение пуансона с постоянной скоростью.

Численно все краевые задачи решались методом конечного элемента в осесимметричной постановке. Конечно-элементная модель включает 11024 узлов и 10573 элемента. Цилиндрическая заготовка изготовлена из материала Сталь ШХ15 и имеет размеры  $R_3 = 98$  мм,  $H_3 = 120$  мм. Пуансон движется со скоростью  $V_n = 100$  мм/с. Температура предварительного неравномерно нагрева цилиндрической заготовки изменяется от  $T_0 = 1110^\circ\text{C}$  до  $T_0 = 1110^\circ\text{C}$ .

В работе [8] приводятся диапазоны изменения значений коэффициент трения  $\mu$ , полученные экспериментально, в зависимости от типа трения: для сухого трения – коэффициент трения  $\mu > 0,3$ , для комбинированного – коэффициент трения изменяется  $0,1 \leq \mu \leq 0,3$ , для трения с жидкой смазкой коэффициент трения может принимать значения  $0,05 \leq \mu \leq 0,1$ . Поэтому решение краевых контактных термовязкопластических задач проводилось для каждого типа трения на контактных поверхностях между пуансоном и поковкой и соответственным коэффициентом трения  $\mu = 0,5$  для сухого трения,  $\mu = 0,3$  для комбинированного,  $\mu = 0,1$  для трения со смазкой.

Для первого этапа технологического процесса горячей штамповки – осадки решается задача определения напряженно-деформированное состояние и распределение линий Лагранжа в предварительно нагретой цилиндрической заготовке (см. рис. 1). Искривление линий Лагранжа после пластического деформирования заготовки свидетельствует о перераспределении волокнистой структуры материала (макроструктура претерпевает изменение).

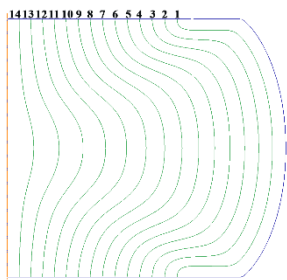


Рис. 1 – Волокнистая структура заготовки после осадки

На втором этапе горячей штамповки с деформированной заготовкой проводилась операция двухпроходной формовки. Сначала проходят пуансоном меньшего диаметра ( $D = 76$  мм), затем после поворота первоначальной поковки на 180 град, осуществляется повторная проходка пуансоном с диаметром, соответствующим внутреннему диаметру поковки кольца ( $D = 96$  мм). Схема проведения двухпроходной формовки приведена на рис. 2. На этапе процесса двухпроходной формовки решается красная контактная задача термовязкопластичности с учетом трения в контактных зонах для предварительно деформированной заготовки на этапе осадки. На завершающем этапе проводилась операция прошивки.

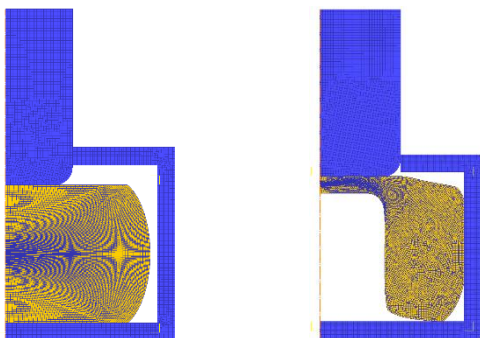


Рис. 2 – Схема проведения двухпроходной формовки

На рис. 3 представлены картины распределения линий Лагранжа, соответствующие распределению волокнистой структуры в поковках кольца подшипника, полученных при решении нестационарной контактной задачи деформирования поковки для трех значений коэффициента трения: а)  $\mu = 0,1$ ; б)  $\mu = 0,3$ ; в)  $\mu = 0,5$ .

Анализ картин распределения волокнистой структуры позволил отметить, что некоторые волокна выходят на внутреннюю поверхность поковки (дорожку качения) под углом  $\varphi$ , который измеряется между касательной к линии Лагранжа (волокна) и образующей внутренней поверхности поковки.

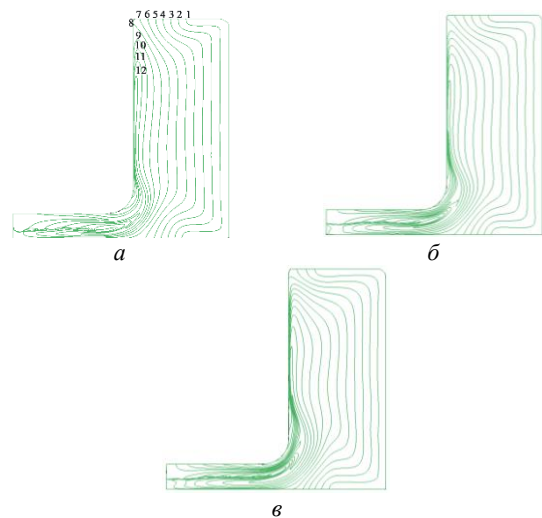


Рис. 3 – Распределение линий Лагранжа в поковке после двухпроходной формовки с учетом трения: а –  $\mu = 0,1$ ; б –  $\mu = 0,3$ ; в –  $\mu = 0,5$

В таблице 1 приведены значения углов выхода волокон на дорожку качения для соответствующих номеров линий Лагранжа (см. рис. 3) для различных значений коэффициента трения  $\mu$ .

Таблица 1 – Углы выхода волокон на дорожку качения

№ линии Лагранжа	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\mu = 0,1$	-	-	-	-	-	-	-	45°	10°
$\mu = 0,3$	-	-	-	-	-	40°	10°	3°	1°
$\mu = 0,5$	-	-	-	45°	10°	7°	5°	5°	5°

Из приведенных данных табл. 1 видно, что наименьшее количество линий Лагранжа, которые выходят на внутреннюю поверхность поковки (дорожку качения) соответствует решению, полученному для значения коэффициента трения  $\mu = 0,5$  (тип трения – смазка). На торцевую поверхность выходят линии №1 по линию №7. Следует отметить, что наименьшее значение углов выхода линия Лагранжа на дорожку качения соответствует распределению волокнистой структуры поковки, возникающей при прохождении пуансоном с комбинированным типом трения (коэффициент трения  $\mu = 0,3$ ). Если вычислить величину суммарного угла выхода линий Лагранжа на внутреннюю поверхность поковки подшипникового кольца  $\varphi_{\Sigma} = \varphi_i$ , то наименьшее его значение  $\varphi_{\Sigma} = 54^0$  будет соответствовать волокнистой структуре, полученной при комбинированном типе трения (коэффициент трения  $\mu = 0,3$ ).

Анализ картин распределения линий Лагранжа на рис. 3а ( $\mu = 0,3$ ) показывает лучшую параллельность линий образующим внешней и внутренней поверхности поковки. Это дает основание предположить, что подшипниковые кольца с данной макроструктурой материала будут иметь более высокую контактную выносливость, т.к.

експериментально встановлено [1], що в реальних умовах експлуатації при навантаженні підшипникового кільця для забезпечення максимальної контактної вносливості, траєкторії головних касательних напружень повинні проходити паралельно волокнам матеріала, а нормальні напруження діяти перпендикулярно волокнам (направленню розповсюдження тріщин).

**Висновки.** В роботі проведено численне моделювання двох етапів технологічного процесу гарячої штамповки (осадки і двохпроходної формувки) підшипникового кільця. С цією метою методом кінцевого елемента була численно розв'язана нестационарна контактна термовязкопластична задача з відповідними граничними умовами. Отримані картини розподілу волокнистої структури поковки кільця підшипника в вигляді ліній Лагранжа. Проведено порівняння картин розподілу ліній Лагранжа для трьох типів тертя: сухого, комбінованого і тертя зі смазкою. Аналіз величин кутів виходу ліній Лагранжа на внутрішню поверхню поковки (дорожку качення) дозволив вибрати комбінований тип тертя на контактних поверхнях заготовки-пуансон і заготовка-матриця як варіант умов тертя, при якому матеріал має раціональну волокнисту структуру. Це дозволяє забезпечити максимальну експлуатаційну довговічність коліс підшипника.

#### Список літератури

1. Колотенков І. В. К вопросу о влиянии макроструктуры металла на долговечность подшипников качения / И. В. Колотенков // Труды ВНИИПП. – 1962. – Вып. 3. – С. 3–16.
2. Раузин Я. Р. Влияние макроструктуры металла на контактную вносливость и долговечность подшипников качения / Я. Р. Раузин // Контактная прочность машиностроительных материалов: Сб. научных трудов. – Москва : Наука. – 1964. – С. 51–55.
3. Леванов А. Н. Контактное трение в процессах обработки давлением / А. Н. Леванов, С. П. Буркин. – Москва : Металлургия, 1976. – 416 с.
4. Яковлев С. П. Изменение коэффициента трения в зависимости от скорости деформирования и вида технологической смазки / Известия ВУЗов. Машиностроение. 1987. №3. – с. 144–148.

#### Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

**Влияние трения на распределение волокнистой структуры поковки подшипникового кольца при горячей штамповке / Е. Д. Грозенок, Э. А. Симсон, А. В. Степук С. Ю. Шергин // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – № 30(1202). – С. 32–36. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2519-2671**

**Вплив тертя на розподіл волокнистої структури поковки підшипникового кільця при гарячій штамповці / Є. Д. Грозенок, Е. А. Симсон, А. В. Степук, С. Ю. Шергін // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – № 30(1202). – С. 32–36. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2519-2671**

**Distribution of the fibrous structure in bearing rings during hot stamping / I. D. Grozenok, E. A. Simson, A. V. Stepuk, S. Y. Shergin // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy. – Kharkiv: NTU «KhPI» – 2016. – No 30 (1202). – P. 32–36. – Bibliogr.: 8 – ISSN 2519-2671**

5. Чумаченко Е. Н. Реализация контактного взаимодействия в процессах обработки материалов давлением / С. А. Аксенов, С. А. Бобер // Методы розв'язання прикладних задач механіки твердого тіла, 2010, вип. 11 – С. 299–305.

6. Унсков Е. П. Теорияковки и штамповки / Е. П. Унсков, У. Джонсон, В. Л. Колмогоров [и др]. – Москва: Машиностроение, 1992. – 720 с.

7. Грозенок Е. Д. Численное моделирование температурного поля заготовок при индукционном нагреве для изготовления подшипниковых колец / Е. Д. Грозенок, Э. А. Симсон, А. В. Степук, С. Ю. Шергин // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Динаміка і міцність машин. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – № 26. – 4 с.

8. T. Altan and A.E. Tekkaya Sheet Metal Forming. Fundamentals 2012 ASM International, 294 p.

#### References (transliterated)

1. Kolotenko I. V. K voprosu o vliyaniі makrostruktury metalla na dolgovечnost podshpnikov kacheniya. [On the effect of metal macrostructure on the durability of rolling bearings]. Moskva, Trudy VNIIPP, 1962, No 3, pp. 3–16.

2. Rauzin Ya. R. Vliyaniє makrostruktury na kontaktnuyu vyinoslivost i dolgovечnost podshpnikov kacheniya. [Influence of metal macrostructure to contact endurance and durability of rolling bearings]. Kontaktnaya prochnost mashinostroytelnykh materialov: Sb. nauchnykh trudov. Moscow, Nauka Publ., 1964, pp. 51–55.

3. Levanov A.N. Kontaktnoe trenie v processah obrabotki davleniem [Contact friction in the forming process]. Moscow, Metallurgiya Publ. 1976, 416 p.

4. Yakovlev S.P. Izmeneniє koeficienta treniya v zavisimosti ot skorosti deformirovaniya i vida tehnologicheskoy smazki [The change of the friction coefficient depending on the type of deformation and the rate of technological lubricant]. Izvestiya VUZov. Mashinostroeniє Publ., 1987. No 3, pp. 144–148.

5. Chumachenko E.N. Realizaciya kontaktnogo vzaimodeystviya v processah obrabotki materialov davleniem [Implementation of contact interaction in the material forming processes]. Metodi rozvyazannya prikladnykh zadach mehaniki tverdogo tila 2010 vip. 11, pp. 299–305 p.

6. Unskov E. P., Dzhonson U., Kolmogorov V. L. i dr. Teoriya kovki i shampovki [The theory of forging and stamping]. Moscow, Mashinostroeniє Publ. 1992, 720 p.

7. Grozenok E. D., Simson E. A., Stepuk A. V., Shergin S. Yu. Chislennoє modelirovaniє temperaturnogo polya zagotovok pri induktsionnom nagreve dlya izgotovleniya podshpnikovyykh kolets. [Numerical simulation of temperature field in induction heating of blanks for the manufacture of bearing rings]. Vіsnik NTU «HPІ». Seriya: Dinamika i mitsnist mashin. Kharkov, NTU «HPІ», 2016, no 26 (1198), pp. 50–53.

8. T. Altan and A.E. Tekkaya Sheet Metal Forming. Fundamentals 2012 ASM International 294 p.

Поступила (received) 10.11.2016



*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

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

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

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

**Симсон Едуард Альфредович** – доктор технічних наук, кафедра сопроотивлення матеріалів НТУ «ХПІ», тел.: (057)-70-761-78, e-mail: simson@upes.ua

**Симсон Едуард Альфредович** – доктор технічних наук, кафедра опору матеріалів НТУ «ХПІ», тел.: (057)-70-761-78, e-mail: simson@upes.ua

**Simson Eduard** – Doctor of Sciences (High Ph. D.) Strength of materials' Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", tel.: (057)-70-761-78, e-mail: simson@upes.ua

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

**Степук Олександр Володимирович** – кандидат фізико-математических наук, старший науковий співробітник, НТУ «ХПІ», 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

**Шергин Сергей Юрьевич** – старший преподаватель кафедры сопроотивлення матеріалів НТУ «ХПІ», тел.: 70-761-78, e-mail: Sshergin@kpi.kharkov.ua

**Шергин Сергей Юрьевич** – ст. викладач кафедри опору матеріалів НТУ «ХПІ», тел.: 70-761-78, e-mail: Sshergin@kpi.kharkov.ua

**Shergin Sergei** – sr. lecturer Strength of materials' Department National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", tel.: (057)-70-761-78, e-mail: Sshergin@kpi.kharkov.ua



УДК 621.771:62.419-5

**В. Г. ЗАГОРЯНСКИЙ, Л. Э. ДИКАЯ****ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ И СИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКЕ ТРЕХСЛОЙНЫХ ПАКЕТОВ «МЕДЬ-АЛЮМИНИЙ-МЕДЬ»**

В статье проведено сравнение полученных экспериментально толщин слоев после прокатки трехслойных пакетов «медь-алюминий-медь» и рассчитанных по предложенной ранее методике, включающей оптимизационную модель, основанную на энергетическом подходе. Сравнение показало, что полученные результаты практически совпадают, что подтверждает адекватность методики расчета. Экспериментально установлено, что уменьшение толщины слоя меди в исходном пакете приводит к снижению его деформации. Получены графики зависимостей среднего контактного давления на валки от соотношения толщин слоев в пакете. Снижение толщины слоя меди в исходном пакете приводит к уменьшению среднего контактного давления.

**Ключевые слова:** холодная прокатка, трехслойный пакет, деформации слоев, оптимизационная модель, среднее контактное давление.

В статті проведено порівняння отриманих експериментально товщин шарів після прокатування тришарових пакетів «мідь-алюміній-мідь» та розрахованих за запропонованою раніше методикою, яка включає оптимізаційну модель, яка ґрунтується на енергетичному підході. Порівняння показало, що отримані результати практично співпадають, що підтверджує адекватність методики розрахунку. Експериментально встановлено, що зменшення товщини шару міді у вихідному пакеті призводить до зниження його деформації. Отримані графіки залежностей середнього контактного тиску на валки від співвідношення товщин шарів в пакеті. Зниження товщини шару міді у вихідному пакеті призводить до зменшення середнього контактного тиску.

**Ключові слова:** холодне прокатування, тришаровий пакет, деформації шарів, оптимізаційна модель, середній контактний тиск.

In the paper is compared the thickness of layers obtained experimentally after rolling of three-layered package «copper-aluminum-copper» and ones calculated in previously proposed method, that includes an optimization model based on the energy method. The comparison showed that the results are almost the same, which confirms the adequacy of the calculation method. It was established experimentally that the reduction in the thickness of the copper layer in the initial sandwich reduces its deformation. The obtained graphs of dependences of the average contact pressure on the rolls on the ratio of the thicknesses of the layers in the sandwich (it was rolled as a two-layered packets, and three-layered sandwiches with cladding layers of a copper) show that this dependence is close to linear. It is established that the average contact pressure over the whole range of ratios of thicknesses of the layers in the sandwich from the side of the aluminum is higher than that of the copper. Reducing the thickness of the layer of copper in the original sandwich results in the reduction of the average contact pressure.

**Keywords:** cold rolling, three-layered package, deformations of layers, optimization model, average contact pressure.

**Введение.** При технологической подготовке производства биметаллов прокаткой одной из важнейших задач, позволяющей избежать затратных экспериментальных решений, является обоснование, на основе теории пластической деформации биметаллов, предварительной гипотезы о получаемых толщинах слоев в готовом биметалле, определяемых эксплуатационными требованиями к нему.

При получении биметалла прокаткой основная доля неравномерности деформации ложится на первый проход, обеспечивающий надежное схватывание слоев. При получении прокаткой биметаллов из цветных металлов и сплавов, в частности, композиции алюминий-медь, при значительных относительных деформациях обеспечивается надежное плакирование в первом проходе [1].

**Анализ последних исследований и литературы.**

Общие энергетические теоремы теории упруго-пластических деформаций предложены Л. М. Качановым [2] и им же, на основе этой теории, разработаны приближенные вариационные методы решения упруго-пластических задач.

В соответствии с ними, принцип минимума полной мощности деформируемого тела (принцип возможных изменений деформированного состояния) рассматривает мощность этого тела как функционал произвольной системы скоростей, которая удовлетворяет кинематическим граничным условиям; функционал принимает минимальное значение для системы скоростей, фактически реализуемой в деформируемом теле.

Теоретическое решение задачи несимметричной прокатки полос в валках одинакового диаметра (типичный случай прокатки биметаллических пакетов) с использованием энергетического метода приведено, в частности, в работе [3].

В работе [4] представлена оптимизационная модель (и ее программная реализация), основанная на известной методике расчета толщин слоев биметалла после прокатки по энергетическому методу с применением минимума мощности внешних сил.

Основой для оптимизационной модели послужили аппарат теории совместной пластической деформации разных металлов, разработанный исследователями Магнитогорского политехнического института [5], а также модели прокатки, предложенные в работах иностранных исследователей [6,7]. Отметим, что результаты расчетов по оптимизационной модели [4] требуют экспериментального подтверждения.

Также важным попутно решаемым в ходе экспериментов вопросом является установление закономерностей влияния соотношения толщин слоев в исходном пакете на среднее контактное давление пакета на валки, определяющее силовые характеристики процесса. Таким образом, экспериментальное исследование влияния соотношения толщин слоев в исходном пакете (случай трехслойного пакета) на деформационные и силовые параметры процесса его холодной прокатки позволит оптимизировать параметры процесса.

**Цель работы** – для трехслойных пакетов медь-алюминий-медь определенной толщины, варьируя

соотношением толщин слоев, экспериментально получить закономерности деформации слоев, проверяя таким образом полученные ранее методики расчета толщин слоев, и для этих пакетов (а также и двухслойных) определить закономерности изменения среднего контактного давления при прокатке.

**Материалы исследований.** Исследование проводили на трехслойных пакетах по схеме Т-М-Т (твердый-мягкий-твердый слой) (а также двухслойных пакетах), собранных из листов меди М1 и алюминия АД0, отожженных, промытых химически чистым ацетоном, зачищенных кардной щеткой и склепанных на переднем конце образцов.

Прокатка пакетов по схеме Т-М-Т представляет больший интерес, чем по схеме М-Т-М, так как в работе [8] указывается, что схема Т-М-Т приводит к большей, по сравнению с пакетами М-Т-М, неравномерности деформаций слоев в готовом биметалле, что определяется возникающим в твердых слоях разноименным напряженным состоянием. При прокатке по схеме М-Т-М во внутреннем твердом слое возникают растягивающие напряжения, а в мягких слоях в приконтактных поверхностях с валком и твердым слоем возникают дополнительные сжимающие напряжения. Такое уравнивание обеспечивает минимальную неравномерность деформаций.

Пакеты собирались из листов алюминия (межгосударственный стандарт ГОСТ 21631-76. Листы из алюминия и алюминиевых сплавов. Технические условия) марки АД0 (химический состав – по межгосударственному стандарту ГОСТ 4784-97. Алюминий и сплавы алюминиевые деформируемые. Марки) и листов меди (межгосударственный стандарт ГОСТ 495-92. Листы и полосы медные. Технические условия) марки М1 (химический состав – по межгосударственному стандарту ГОСТ 859-2001. Медь. Марки).

Использовавшиеся варианты сочетаний толщин слоев в пакетах приведены в табл. 1. Соотношение толщин слоев составляло 0,15...6,5.

Приняты следующие условные обозначения: первая цифра в обозначениях толщин: 0 – начальная толщина, 1 – конечная толщина; вторая цифра в обозначениях толщин: 1 – средний слой, 2 – наружные слои. Тогда  $h_{01}$  и  $h_{02}$  – начальные толщины слоев, соответственно среднего и наружных,  $h_1$  – конечная толщина пакета после прокатки;  $h_{11}$  и  $h_{12}$  – толщины среднего и наружных слоев в пакете после прокатки.

Таблица 1 – Деформации слоев после прокатки трехслойных пакетов алюминий-медь

Алюминий	$h_{01}$ , мм	2	5	7,5	12	13
		55	55	52	49	49
	$h_{11}$ , мм	0,9	2,25	3,6	6,12	6,63
Медь	$h_{02}$ , мм	13	10	7,5	3	2
	$\varepsilon_{\square}$ , %	42	38	32	17	15
	$h_{12}$ , мм	7,54	6,2	5,1	2,49	1,7
Пакет	$h_{01}/h_{02}$	0,154	0,5	1	4	6,5
	$h_1$ , мм	8,44	8,45	8,7	8,61	8,33
	$\varepsilon_{\Sigma}$	0	4	0	0	0

Для холодной прокатки пакетов использовался лабораторный стан дуо со шлифованными валками диаметром 180 мм. В бочках валков были установлены вкладыши с точечными месдозами для замера удельного давления (площадь штифтов приблизительно 1 мм<sup>2</sup>).

Относительная деформация пакетов в первом проходе (достаточном для прочного соединения слоев [1]) составляла 42...44%.

После холодной прокатки пакеты разрезали для замера толщин слоев в продольном осевом сечении.

Результаты исследований деформаций слоев трехслойных пакетов медь-алюминий-медь суммарной толщиной 15 мм представлены в табл. 1.

Отметим, что уменьшение толщины меди в исходном пакете приводит к снижению деформации слоя меди.

Диаграммы наклепа при холодной прокатке биметаллических пакетов из алюминия А000 и электролитической меди (сочетание металлов слоев, близкое к исследуемому в данной работе) приведены в [9] (рис. 1).

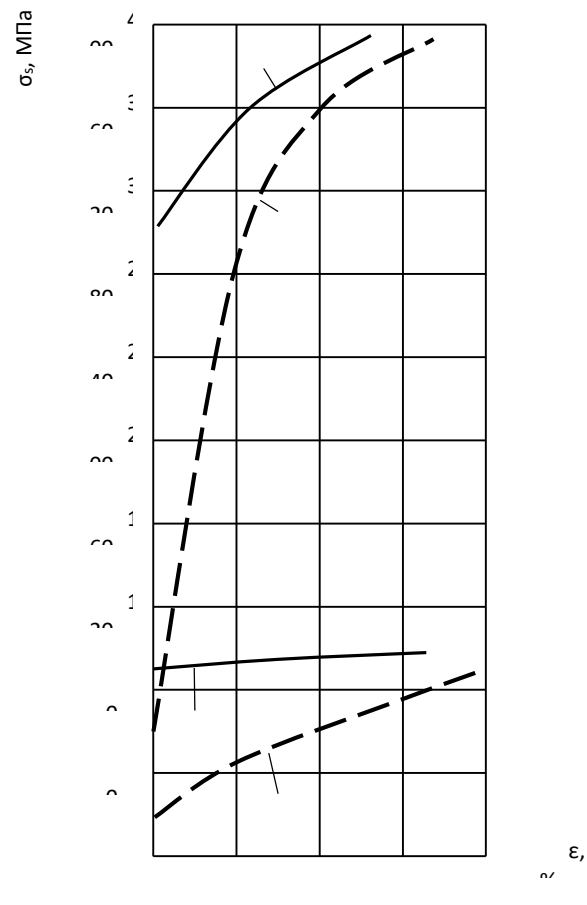


Рис. 1 – Повышение сопротивления деформации слоев листового биметалла при холодной прокатке [9]:  
1 – отожженный алюминий; 2 – нагартованный алюминий;  
3 – отожженная медь; 4 – нагартованная медь

В соответствии с диаграммой наклепа, приведенной на рис. 1, при относительном обжатии  $\varepsilon = 45\%$  для отожженного алюминия предел текучести  $\sigma_s$

составляет 60...65 МПа, для отожженной меди – 370 МПа. Таким образом, сопротивление деформации твердого слоя (медь) превышает сопротивление мягкого (алюминий) примерно в 5,5 раз.

Рассмотрим особенности программы, используемой при моделировании и оптимизации данной задачи [4], и применяемого в ней итерационного алгоритма.

Для решения задач оптимизации в табличном процессоре Microsoft Excel используется надстройка (программа) Поиск решения (в оригинале – Solver). Транснациональная компания Frontline System, США, разработчик программы Solver, уже давно специализируется на разработке мощных и удобных способов оптимизации, встроенных в среду популярных табличных процессоров разнообразных фирм-производителей (Solver для MS Excel, Adobe для Quattro Pro и др.).

Высокая эффективность их применения объясняется интеграцией программы оптимизации и табличного бизнес-документа. Программа Solver, встроенная в среду табличного процессора MS Excel, в связи с его мировой популярностью, является наиболее распространенным инструментом для поиска оптимальных решений в сфере бизнеса.

Надстройка Поиск решения, используемая с 1991 года, предназначена для решения определенных систем уравнений, линейных и нелинейных задач оптимизации. Поиск решений является частью блока задач, который иногда называют анализ "что-если" (изменение значений ячеек и анализ влияния этих изменений на результаты вычисления формул на рабочем листе, в которые входят ссылки на эти ячейки). Поиск решения позволяет [10]: получить несколько решений задач, если решение многовариантно; работать одновременно с несколькими изменяемыми ячейками; налагать ограничения на значения изменяемых ячеек.

Процедура поиска решения работает с группой ячеек, которые входят в виде ссылок в функцию в целевой ячейке и изменяет значения в этих ячейках до тех пор, пока не будет найдено оптимальное значение функции, содержащейся в целевой ячейке. Для этой процедуры задаются также ограничения, представляющие собой уравнения или неравенства, для решения системы которых применимы итерационные численные методы (в надстройке Поиск решения можно выбрать опцию Метод поиска, позволяющую выбрать алгоритм оптимизации (метод Ньютона или метод сопряженных градиентов). Во втором методе используется меньше памяти, но выполняется больше итераций, чем в первом.

Для расчета заданного значения применяются различные математические методы поиска.

Исходные данные	Переменные	Мощности, Вт·м	Ограничения
$h_{01}$ , мм	$h_{11}$ , мм	$N_1$	8,550001
$h_{02}$ , мм	$h_{12}$ , мм	$N_2$	0,0042
$h_0$ , мм		$N_F$	0,0081
$\epsilon$		$N_p$	0,0657
$h_1$ , мм		$N_{C1}$	0,0045
$\Delta h_1$ , мм		$N_{C2}$	0,0012
$\Delta h_2$ , мм			
$\Delta h_2$ , мм	0,231699	Целевая функция (суммарная мощность, Вт·м)	0,2718
D, мм	180		
f	0,3		
p	0,3		
$h_2$ , мм	24,05627		
$\beta$	0,128532		
$\sec^2 \beta$	1,016704		

Рис. 2 – Результаты выполнения оптимизации примера по методике [4] на рабочем листе Microsoft Excel

Надстройка Поиск решения использует алгоритм нелинейной оптимизации Generalized Reduced Gradient (GRG2), разработанный Л. Ласдоном (Техасский университет, г. Остин) и А. Уореном (государственный университет, г. Кливленд, Огайо) [11]. Алгоритмы симплексного метода и метода «branch-and-bound» для решения линейных и целочисленных задач с ограничениями разработаны Джоном Уотсоном (John Watson) и Деном Филстра (Dan Fylstra) из Frontline Systems, Inc.

Результат выполнения оптимизации примера данной задачи приведен на рис. 2 (экранная копия рабочего листа Microsoft Excel).

Для случая прокатки пакета медь-алюминий-медь с исходной толщиной пластин меди (общей) 2 мм и алюминия 13 мм, расчет по оптимизационной модели дает толщины слоев: алюминия – 6,78 мм, меди – 1,77 мм (рис. 2). Результаты эксперимента по прокатке данного пакета (табл. 1): толщина слоя алюминия – 6,63 мм, меди – 1,7 мм.

Таким образом, применимость на практике программной реализации оптимизационной модели расчета толщин слоев на основе энергетического похода [4] подтверждается экспериментально с большой точностью.

На рис. 3 показаны зависимости среднего контактного давления на валки от соотношения толщин слоев в пакете (прокатывались как трехслойные пакеты с медным плакирующим слоем, так и двухслойные пакеты).

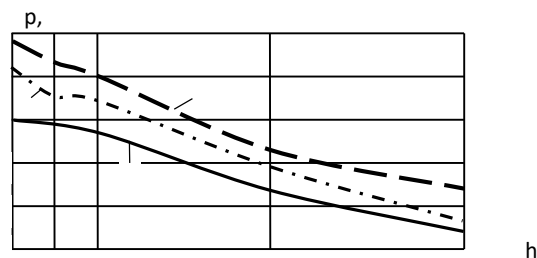


Рис. 3 – Среднее контактное давление на валки:  
1 – со стороны алюминия (двухслойный пакет),  
2 – со стороны меди (двухслойный пакет),  
3 – со стороны меди (трехслойный пакет)

Обращает внимание тот факт, что во всем диапазоне отношений толщин слоев в пакете среднее контактное давление со стороны алюминия выше, чем со стороны меди. Уменьшение толщины слоя меди в исходном пакете приводит к снижению среднего контактного давления.

**Выводы.** Полученные экспериментальной прокаткой трехслойных пакетов медь-алюминий-медь толщины слоев соответствуют рассчитанным по методике, основанной на энергетическом подходе. Уменьшение толщины медного слоя в исходном пакете приводит к снижению его деформации. Полученные графики зависимостей среднего удельного давления на валки от соотношения толщин слоев в пакете (двухслойные пакеты и трехслойные пакеты с плакирующим слоем меди) показывают, что эти зависимости близки к линейным. Среднее контактное давление во всем диапазоне отношений толщин слоев в пакете со стороны алюминия выше, чем со стороны меди. Уменьшение толщины слоя меди в пакете приводит к снижению среднего контактного давления.

#### Список литературы

1. Экспериментальное исследование механики прокатки биметалла / П. И. Полухин, А. В. Архангельский, Ю. В. Кнышев, В. А. Мастеров // Известия вузов. Черная металлургия. – 1965. – № 8. – С. 73–79.
2. Малинин Н. Н. Прикладная теория пластичности и ползучести / Н. Н. Малинин. – М.: Машиностроение, 1975. – 400 с.
3. Синицын В. Г. Теоретическое исследование процесса несимметричной прокатки / В. Г. Синицын, И. А. Андрющенко, // Известия вузов. Черная металлургия. – 1973. – № 1. – С. 69–72.
4. Загорянский В. Г. Моделирование толщин слоев после прокатки симметричных биметаллических пакетов на основе энергетического подхода / В. Г. Загорянский, О. В. Загорянский // Научный вестник Донбасской государственной машиностроительной академии. – Краматорск: ДГМА, 2013. – № 2 (12Е). – С. 63–69.
5. Дорогобид В. Г. Теория прокатки слоистых металлов / В. Г. Дорогобид, Н. Н. Ильина. – Магнитогорск: МГТУ, 1998. – 81 с.
6. Mathematical model of bimetallic sheet rolling / Dyja H., Hietrzyk M. // *Metallurgia i odlewnictwo*. – 1992. – Tom 8. – Zeszyt 2. – s. 43–52.
7. Numerical modelling of cold-roll bonding of clad metal sheets / Luo Chunhui, Pend Dashu, Xu Zuohui // *J. Cent. S. Univ. Technol.* – 1997. – № 2. – pp. 125–127.

#### Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

**Исследование деформаций и силовых параметров при холодной прокатке трехслойных пакетов «медь-алюминий-медь» / В. Г. Загорянский, Л. Э. Дикая // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – № 30(1202). – С. 37–41. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2519-2671**

**Дослідження деформацій і силових параметрів при холодному прокатуванні тришарових пакетів «мідь-алюміній-мідь» / В. Г. Загоряньський, Л. Е. Дика // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – № 30(1202). – С. 37–41. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2519-2671**

**Investigation of deformations and force parameters at cold rolling three-layer packets «copper-aluminum-copper» / V. G. Zagoryanskii, L. E. Dikaya // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy. – Kharkiv: NTU «KhPI» – 2016. – No 30 (1202). – P. 37–41. – Bibliogr.: 11 – ISSN 2519-2671**

8. Кобелев А. Г. Технология слоистых металлов / А. Г. Кобелев, И. Н. Потапов, Е. В. Кузнецов. – М.: Металлургия, 1991. – 248 с.
9. Некоторые особенности прокатки слоистой полосы / П. И. Полухин, А. В. Архангельский, Ю. В. Кнышев, В. А. Мастеров // Известия вузов. Черная металлургия. – 1965. – № 10. – С. 80–83.
10. Шитов В. Н. Excel. Единый справочник / В. Н. Шитов. – М.: ГроссМедиа, 2005. – 512 с.
11. Постановка задачи и решение проблемы с помощью процедуры поиска решения. – Режим доступа : <http://office.microsoft.com/ru-ru/excel-help/HP010072691.aspx>. – Дата обращения : 20 октября 2016.

#### References (transliterated)

1. Poluhin P. I., et al. *Eksperymental'noe issledovanie mehaniki prokatki bimetallo* [Experimental investigation of mechanics of rolling of bimetal]. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya*. 1965, No 8, pp. 73–79.
2. Malinin N. N. *Prikladnaya teoriya plastichnosti i polzuchesti* [Applied theory of plasticity and creep]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1975. 400 p.
3. Sinitsin V. G., et al. *Teoreticheskoe issledovanie protsessy nesimmetrichnoj prokatki*. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya*, 1973, No 1, pp. 69–72.
4. Zagorjanskij V. G. and Zagorjanskij O. V. *Modelirovanie tolshchin sloev posle prokatki simmetrichnyh bimetallicheskih paketov na osnove energeticheskogo podhoda*. *Nauchnyj vestnik Donbasskoj gosudarstvennoj mashinostroitel'noj akademii*. 2013, No 2(12E), pp. 63–69.
5. Dorogobid V. G. and Il'ina N. N. *Teoriya prokatki sloistykh metallov* [Theory of rolling of layered metals]. Magnitogorsk, MGTU, 1998. 81 p.
6. Dyja H. and Hietrzyk M. *Mathematical model of bimetallic sheet rolling*. *Metallurgia i odlewnictwo*, 1992, No 8, pp. 43–52.
7. Luo Chunhui, Pend Dashu and Xu Zuohui. *Numerical modelling of cold-roll bonding of clad metal sheets*. *J. Cent. S. Univ. Technol*, 1997, No 2, pp. 125–127.
8. Koblelev A. G., Potapov I. N. and Kuznetsov E. V. *Tehnologiya sloistykh metallov* [Technology of layered metals]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1991. 248 p.
9. Poluhin P. I., et al. *Nekotorye osobennosti prokatki sloistoj polosy* [Some features of rolling of layered stripe]. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya*. 1965, No 10, pp. 80–83.
10. Shitov V. N. *Excel. Edinyj spravochnik* [Excel. Unified reference book]. Moscow, GrossMedia Publ., 2005. 512 p.
11. *Postanovka zadachi i reshenie problem s pomosh'yu protsedury poiska resheniya* [Statement of the problem and the solution to the problem by using the search procedures solutions]. Available at: <http://office.microsoft.com/ru-ru/excel-help/HP010072691.aspx>. (accessed 20.09.2016)

Поступила (received) 05.11.2016

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Загорянський Володимир Георгійович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри транспортних технологій Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського, тел.: (050) 874-87-48; e-mail: zagor\_vlad@ukr.net.

**Загорянский Владимир Георгиевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры транспортных технологий Кременчугского национального университета имени Михаила Остроградского, тел.: (050) 874-87-48; e-mail: zagor\_vlad@ukr.net.

**Zagoryanskiy Vladimir Georgievich** – candidate of technical sciences, associated professor of department of transportation technology of Mykhailo Ostrohradskiy Kremenchuk National University, tel.: (050) 874-87-48; e-mail: zagor\_vlad@ukr.net.

**Дикая Луиза Эхматовна** – ассистент кафедры технологии машиностроения Кременчугского национального университета имени Михаила Остроградского, тел.: (096) 254-20-90; e-mail: lu.di@mail.ru.

**Дика Луїза Ехматівна** – ассистент кафедр технології машинобудування Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського, тел.: (096) 254-20-90; e-mail: lu.di@mail.ru.

**Dikaya Luiza Ehmatorvna** – assistant of department of technology of machine-building of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University, tel.: (096) 254-20-90; e-mail: lu.di@mail.ru.

УДК 621.771.06

**Ю. Д. МУЗЫКИН, С. В. МАЦКО, П. П. МОСКАЛЕНКО, В. В. ТАТЬКОВ**

## **АНАЛИЗ РАБОТЫ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ И ПУТИ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ИХ АВАРИЙНЫХ ОТКАЗОВ НА НЕПРЕРЫВНОМ ТОНКОЛИСТОВОМ СТАНЕ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ 1680 ПАО «ЗАПОРОЖСТАЛЬ»**

Рассмотрены причины разрушения зубчатых передач прокатного оборудования в зависимости от условий их эксплуатации, и по результатам статистического анализа установлен закон эмпирического распределения рабочей нагрузки для стана горячей прокатки 1680 ПАО «Запорожсталь». Показан один из способов контроля остаточного ресурса работы зубчатых передач, по величине износа боковой поверхности зубьев. Предложен прибор для диагностики износа зубьев без разборки сопряжения. Показано, как осуществляя мониторинг износа зубьев, можно прогнозировать остаточный ресурс их работы.

**Ключевые слова:** зубчатая передача, разрушение, закон распределения, аварийный отказ, диагностика, остаточный ресурс.

Розглянуто причини руйнування зубчастих передач прокатного обладнання в залежності від умов їх експлуатації, і за результатами статистичного аналізу встановлено закон емпіричного розподілу робочого навантаження для стану гарячої прокатки 1680 ПАТ «Запоріжсталь». Показаний один із способів контролю залишкового ресурсу роботи зубчастих передач, за величиною зносу бічної поверхні зубів. Запропоновано прилад для діагностики зносу зубів без розбирання сполучення. Показано, як здійснюючи моніторинг зносу зубів, можна прогнозувати залишковий ресурс їх роботи.

**Ключові слова:** зубчаста передача, руйнування, закон розподілу, аварійна відмова, діагностика, залишковий ресурс.

Experience in operating gears in the rolling equipment as well as monitoring of failures occurring at a metallurgical plant PAO "Zaporizhstal" shows that the cause of the destruction of the gears are different types of wear, which, depending on the particular equipment and technological features of its operation can lead to a variety of destruction : mechanical, molecular mechanical, corrosion and mechanical. The nature of the dominant type of destruction depends on many, often deterministic operating parameters and therefore to specify exactly what kind of destruction takes place in a particular gear pairing in most cases not possible. The causes of the destruction of gears rolling equipment, depending on their operating conditions, and the results of the statistical analysis of the law established empirical distribution of the workload for the hot rolling mill 1680 Public company "Zaporizhstal". It shows one way to control the residual service life of the gears, the magnitude of the lateral surface of the wear of teeth. A device for the diagnosis of tooth wear without disassembling the coupling. It is shown as monitoring the wear of the teeth, it is possible to predict the residual life of their work. An analysis of the working conditions of gears in the rolling equipment allows you to set the general trends of operation: high loads with a significant dynamic component; wide operating temperature range; a significant level of low- and high-frequency vibration components associated with gear pair; unsatisfactory service conditions caused by high weight and overall performance gear.

**Keywords:** gear, destruction, distribution law, crash, diagnosis, residual life.

**Введение.** Опыт эксплуатации зубчатых передач в прокатном оборудовании, а также мониторинг отказов, имевших место на металлургическом комбинате ПАО «Запорожсталь» показывает, что причиной разрушения зубчатых колес являются различные виды износа, которые в зависимости от конкретного оборудования и технологических особенностей его эксплуатации могут приводить к различным разрушениям: механическому, молекулярно-механическому, коррозионно-механическому. Характер доминирующего вида разрушения зависит от многих, часто не детерминированных параметров эксплуатации, и поэтому указать точно, какой вид разрушения имеет место в конкретном зубчатом сопряжении, в большинстве случаев не представляется возможным.

Анализ условий работы зубчатых передач в прокатном оборудовании позволяет установить общие тенденции эксплуатации: высокие нагрузки со значительной динамической составляющей; широкий температурный диапазон работы; значительный уровень низко- и высокочастотных вибраций деталей, сопряженных с зубчатой парой; неудовлетворительные условия обслуживания, вызванные высокими габаритными и весовыми показателями передач. Поэтому надежность работы зубчатых передач, которая зависит практически от всех перечисленных параметров, является случайной

величиной и может рассматриваться только в вероятностной постановке.

При определении надежности работы зубчатых передач независимо от вида разрушения используется принцип линейного суммирования повреждений на всем интервале действия переменной нагрузки. Физический смысл линейного суммирования заключается в том, что, используя принцип суперпозиции, заменяем истинную циклограмму нагружения на типовой график, представляющий монотонно убывающую зависимость различной интенсивности, которая определяет один из шести типовых режимов работы [1]. Фактический характер нагружения зубчатых передач связан с реализацией конкретного технологического процесса и является неизменным условием при использовании метода линейного суммирования.

**Цель работы, постановка задачи.** На практике для описания случайных величин успешно используют математическое моделирование законов распределения, среди которых особое место занимает нормальный закон распределения. Согласно теореме Ляпунова [2] вероятность описания случайной величины нормальным законом распределения тем выше, чем больше независимых факторов оказывает на нее влияние и чем меньше удельный вес каждого из них в конечном результате. Поэтому, для описания характера нагружения зубчатой передачи при работе в



столь масштабной системе как прокатный стан, необходимо определить такой внешний параметр, который, являясь интегральным показателем нагруженности всего стана, позволил бы его фиксацию и мониторинг в течение длительного промежутка времени.

Наиболее полно всем указанным требованиям отвечает параметр крутящего момента на валу электродвигателя AMZ1600GF12MSBA, который непосредственно соединен с вал-шестерней силового редуктора чистой клетки № 5 непрерывного тонколистового стана горячей прокатки НТЛС 1680, установленного в цехе ЦГПТЛ Запорожского металлургического комбината «Запорожсталь». В данном случае величина крутящего момента является функцией большого числа взаимно независимых параметров, таких как марка катаемой стали, температура сляба, геометрические параметры как листа, так и сляба, настройка параметров клетки и так далее.

**Материалы исследований.** Для получения объективного результата, учитывающего все рассмотренные параметры, методами математической статистики была обработана выборка, которая с учетом оценки случайных результатов составила 10550 измерений, полученных за время непрерывной работы стана в течение 120 часов. Исходя из объема выборки, она репрезентативна, а учитывая, что выборка была взята случайным образом из генеральной совокупности в 4500 часов, ее следует признать вполне достоверной.

*Анализ выборки показал, что границы изменения крутящего момента лежат в интервале  $T_{\min} = 40$  кНм и  $T_{\max} = 165$  кНм. С учетом точности измерений и возможностей расшифровки осциллограмм, представляющих изменение крутящего момента на валу электродвигателя во времени, весь диапазон разбит на 5 интервалов с шагом в 25 кНм, (табл. 1) для которых были определены частоты эмпирического и теоретического распределения*

Таблица 1 – Статистические параметры распределения

X		$X_i$	$f_i$	$t_i$	$Z_i$	$f'_i$
от	до					
40	65	52,5	437	2,5	0,0175	238
65	90	77,5	2079	1,21	0,1919	2609
90	115	102,5	5881	0,077	0,3977	5407
115	140	127,5	2016	1,37	0,1561	2122
140	165	152,5	137	2,65	0,0119	162

С учетом полученного характера гистограммы, а также предположения о нормальном законе распределения крутящего момента на валу электродвигателя, было произведено сопоставление эмпирического распределения с теоретическим нормальным. Так как рассматриваемая выборка является репрезентативной, можно принять, что среднее арифметическое значение случайной величины и ее среднее квадратическое отклонение для генеральной совокупности и для рассматриваемой выборки одинаковы, то есть  $\bar{X}_0 = \bar{X}$ ;  $\sigma_0 = S$ . Тогда

$$\bar{X} = \frac{\sum f_i X_i}{n}; \quad S = \sqrt{\frac{\sum f_i (X_i - \bar{X})^2}{n}}$$

где  $X_i$  – середина интервала;

$f_i$  – частота эмпирического распределения;

$n$  – суммарное число измерений.

Результаты расчетов показали, что

$$\bar{X} = 101 \text{ кНм}; \quad S = 19,4 \text{ кНм}.$$

Для сопоставления эмпирического закона распределения с теоретическим, соответствующим

нормальному закону распределения, определим идентичные характеристики частот. Для этого вычислим параметры:

$$t_i = \frac{|X_i - \bar{X}|}{S} \text{ – промежуточный коэффициент;}$$

$Z_i = f(t_i)$  – характеристика нормального закона распределения;

$$f'_i = \frac{nc}{S} Z_i \text{ – теоретическая частота при}$$

нормальном законе распределения;

$c$  – шаг интервала, равный 25 кНм.

Из рассмотрения соответствующих значений  $f_i$

и  $f'_i$  следует, что эмпирическое распределение и теоретическое нормальное хорошо согласуются и могут быть идентифицированы как аналогичные. Проиллюстрируем данное утверждение, наложив на экспериментальную кривую распределения кривую теоретического нормального закона распределения [2]. Для этого определим координаты характерных точек кривой нормального распределения (табл. 2).

Таблица 2 – Дискретные значения кривой нормального распределения

Абсцисса	$X = \bar{X}$	$X = \bar{X} \pm S$	$X = \bar{X} \pm 2S$	$X = \bar{X} \pm 3S$
Ордината	$f'_x = 0,4 \frac{nc}{S}$	$f'_s = 0,242 \frac{nc}{S}$	$f'_{2s} = 0,054 \frac{nc}{S}$	$f'_{3s} = 0$

Результаты расчетов показывают:  $f'_x = 5438$ ;  
 $f'_s = 3290$ ;  $f'_{2s} = 734$ ;  $f'_{3s} = 0$ .

Сравнение эмпирического и теоретического нормального законов распределения показывает высокую степень их согласования, а, следовательно, характер нагружения зубчатых передач подчиняется нормальному закону распределения (рис. 1). Поэтому среднее значение крутящего момента за рассматриваемый промежуток времени, можно принять как средневзвешенный показатель между максимальной и минимальной величиной крутящего момента.

С учетом полученного закона распределения были определены коэффициенты интенсивности нагружения по изгибу для зубьев шестерни и колеса силового редуктора чистой клетки № 5 НТЛС 1680, которые составили соответственно 0,079 и 0,154. Сравнивая данные результаты с типовыми режимами нагружения по ГОСТ21354-87 [1], находим, что наиболее близким к рассматриваемому является средний равновероятный режим нагружения, для которого соответствующие коэффициенты составляют 0,1 и 0,143

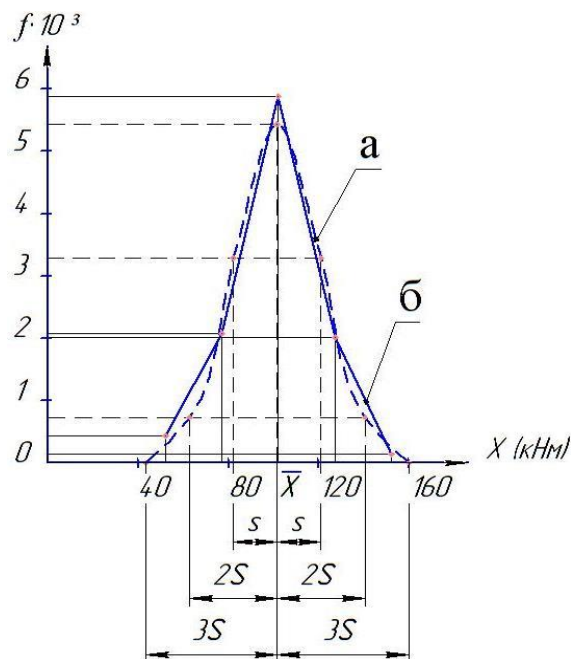


Рис. 1 – Кривые распределения: а – теоретическая; б– эмпирическая

Таким образом, для определения накопленных повреждений зубчатых передач возможно использовать принцип линейного суммирования, так как и характер изменения внешней нагрузки, который подчиняется нормальному закону распределения, и режим нагружения зубьев, который соответствует среднему равновероятному, позволяет использовать принцип суперпозиции при оценке степени износа зубьев. Полученные результаты носят не частный, а общий характер, позволяющий при рассмотрении надежности работы прокатного оборудования использовать найденный закон распределения и для других элементов, так как условия нагружения силового редуктора можно считать интегральным показателем работы всего комплекса в целом.

Для зубчатых передач прокатных станков, с учетом специфики их эксплуатации, в качестве

параметра, определяющего безаварийность их работы, может быть принят износ зубьев, который регламентирует боковой зазор (люфт) в окружном направлении. Осуществляя мониторинг данного показателя за весь период устойчивой работы зубчатого соединения, возможно не только фиксировать реальное состояние зубчатой пары, но и прогнозировать ее остаточный ресурс, а, следовательно, устанавливать плановые ремонтные работы с целью предупреждения аварийных случаев выхода из строя.

В качестве примера реализации предложенного метода контроля состояния зубчатого зацепления был разработан и нашел применение измерительный комплекс для периодической фиксации износа зубьев без разборки в зубчатых муфтах, эксплуатируемых в

линиях главных приводов НТЛС 1680 ЦГПТЛ металлургического комбината ПАО «Запорожсталь». С учетом специфики работы зубчатых муфт доминирующими видами разрушений являются: молекулярно-механическое, приводящее к схватыванию и заеданию, а также коррозионно-механическое, приводящее к фреттингкоррозии. Причина этих разрушений связана с осциллирующим относительным перемещением сопряженных поверхностей зубьев, а также с циклическим характером изменения контактных напряжений, которые в случае возникновения пиковых нагрузок приводят к поломке зуба в ослабленном сечении [3, 4].

С целью предупреждения аварийных ситуаций, связанных с внезапной поломкой предельно изношенных зубьев, ведомственным документом «Правила технической эксплуатации механического оборудования непрерывных широкополосных станов горячей прокатки» предписывается демонтаж зубчатых муфт, у которых износ зубьев по толщине на уровне начальной окружности превышает 30% первоначального размера, а периодичность инструментального обмера зубьев проводится с частотой не реже двух раз в месяц. В реальных условиях эксплуатации такие измерения представляют значительные трудности, как из-за высокой трудоемкости операций разборки и сборки зубчатых муфт, так и необходимости продолжительной остановки стана [5].

Поэтому, для реализации указанных требований предложен измерительный комплекс, который позволяет диагностировать без разборки величину износа зубьев в зубчатых муфтах главных приводов,

включающих весь типоразмерный ряд МЗП-15, МЗП-16, МЗ-20, МЗ-21, МЗ-23. Контроль износа осуществляется с периодичностью плановых остановов стана, но не реже одного раза в 15 дней, за счет кратковременного реверса муфты на угол  $5 \dots 10^\circ$  с пульта оператора или посредством вспомогательных механических средств. Фактический угол поворота втулки зубчатой муфты по отношению к обойме будет зависеть от величины износа боковой поверхности зубьев и соответствовать значению холостого хода. Измерение угла поворота при холостом ходе положено в основу работы измерительного комплекса, так как фиксируемый боковой зазор в зубчатом зацеплении муфты позволяет перевести случайные параметры эксплуатации прокатного стана в строго детерминированную величину износа зубьев.

Измерительный комплекс включает в себя два преобразователя: первичный – состоящий из механической передачи, установленной непосредственно на муфте, и резисторного датчика угловых перемещений типа Д1-01; вторичный – обеспечивающий преобразование аналогового сигнала углового люфта зацепления в цифровой с возможностью архивирования, а также обеспечивающий работу с любым интерфейсом вспомогательных систем.

Механический привод первичного преобразователя обеспечивает не только кинематическую связь между подвижными элементами измерительного комплекса, но и существенно повышает разрешающую способность выбранного метода измерений за счет масштабного коэффициента гибкой передачи и наличия одноступенчатой зубчатой передачи (рис. 2).

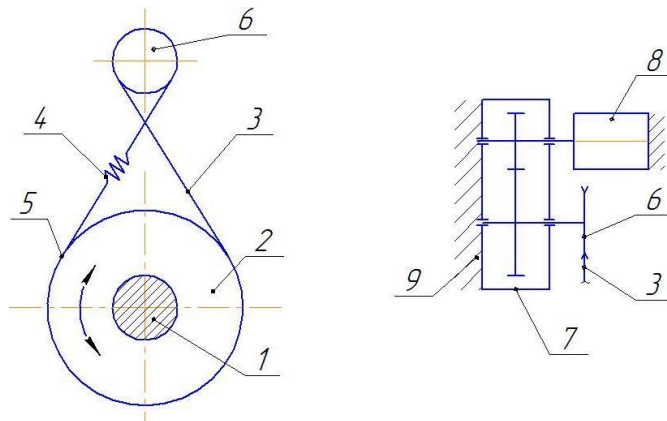


Рис. 2 – Кинематическая (структурная) схема измерительного комплекса

1 – вал зубчатой муфты; 2 – ступица втулки; 3 – гибкая связь; 4 – пружина; 5 – прижимы-фиксаторы; 6 – промежуточный ролик; 7 – манипулятор; 8 – датчик угла поворота; 9 – крышка зубчатой муфты

При повороте ступицы втулки 2 на угол смещения, лимитируемый боковым зазором в зубчатом зацеплении муфты, закрепленная на ней посредством фиксаторов 5 гибкая связь 3, выполненная в виде троса и пружины 4, обеспечивающей усилие предварительного натяжения, передает движение на промежуточный ролик 6, установленный на корпусе зубчатой муфты 9.

Поворот промежуточного ролика через мультипликатор 7, выполненный в виде зубчатой передачи, передается на датчик угловых перемещений 8, который представляет собой резистор линейного типа.

В качестве примера настройки измерительного комплекса применительно к зубчатой муфте МЗ-20, установленной на чистой клетке № 5 НТЛС 1680,

ПАО «Запорожсталь» были получены следующие характеристики. Реальная толщина зуба по хорде делительной окружности втулки и обоймы практически одинаковая и составляет  $S = 21,98$  мм. Предельное значение бокового зазора, соответствующее максимально разрешенному износу зубьев, согласно нормативному документу составляет  $\delta = 6,6$  мм, что вызывает угловое смещение при модуле зацепления  $m = 14$  мм и числе зубьев  $z = 74$ , на диаметре делительной окружности  $d = 1036$  мм, равное углу поворота  $\varphi_m = 1,46^\circ$  [6]. С учетом соотношения линейных размеров ступицы втулки  $d_{ст} = 850$  мм и промежуточного ролика  $d_p = 40$  мм, а также передаточного числа мультипликатора  $U_m = 5$ , максимальный угол поворота промежуточного ролика составит  $\varphi_p = 31^\circ$ , а вала датчика угловых перемещений  $\varphi_d = 155^\circ$ .

Вторичный преобразователь представляет собой переносной прибор, предназначенный для регистрации и сохранения во встроенной долговременной памяти необходимого количества аналоговых и дискретных параметров с возможностью их просмотра и анализа на встроенном графическом ЖКИ дисплее, а также копирования информации на другие ПК. Учитывая, что при измерении износа зубьев необходимо произвести кратковременный реверс в работе зубчатой муфты на угол поворота  $5 \dots 10^\circ$ , данная технологическая операция может рассматриваться как ударная нагрузка, приложенная к зубьям. В этом случае при измерении угла смещения фиксируется не только величина бокового зазора в зубчатом зацеплении, но и упругая деформация всех элементов, участвующих в кинематической передаточной схеме. Чтобы увидеть весь процесс смещения и оценить непосредственно составляющую, связанную с наличием бокового зазора, необходимо, чтобы как вторичный преобразователь, так и его программное обеспечение позволяло фиксировать быстропротекающие процессы и осуществлять их анализ и архивирование. В полной мере указанным требованиям отвечает измерительный диагностический комплекс КСП-12.

Основные технические характеристики предложенного измерительного комплекса для диагностирования без разборки величины износа зубьев в зубчатых муфтах главных приводов на НТЛС 1680 ЦГПТЛ ПАО «Запорожсталь»:

1. Максимальный угол поворота ролика	45
2. Передаточное отношение гибкой связи	21,25
3. Передаточное число мультипликатора	5
4. Максимальный угол поворота первичного преобразователя	225°
5. Выходной сигнал «угол-ток» первичного преобразователя	0–5 мА
6. Количество входов вторичного преобразователя	2

- |                                                        |            |
|--------------------------------------------------------|------------|
| 7. Уровень входного сигнала вторичного преобразователя | 0–5 мА     |
| 8. Напряжение питания                                  | 12 – 24 В. |

Таким образом, адаптируя в каждом конкретном случае узел крепления измерительного комплекса к конкретным конструктивным решениям рассматриваемого зубчатого соединения, становится возможным осуществлять контроль износа боковой поверхности зубьев без разборки сопряжения за счет фиксации холостого хода при реверсе, который соответствует величине люфта в сопряжении. В ряде случаев, при рассмотрении сложных зубчатых узлов, когда невозможно дифференцировать износ каждой пары в отдельности, целесообразно с помощью измерительного комплекса устанавливать интегральное значение износа, которое с высокой степенью вероятности может быть использовано для прогнозирования предельного состояния зубчатого узла в целом.

Осуществляя мониторинг величины износа боковой поверхности зубьев, а также производя сопоставительный анализ с аналогичными результатами, полученными ранее, становится возможным, используя законы экстраполяции [2], прогнозировать остаточный ресурс работы зубчатого сопряжения и тем самым предотвращать аварийную остановку стана.

#### Выводы:

1. В результате анализа работы зубчатых передач, используемых в прокатном оборудовании, были показаны возможные виды их разрушения в зависимости от внешних нагрузок, которые в общем случае являются не детерминированными, а, следовательно, расчеты на прочность носят случайный характер, который можно рассматривать только в вероятностной постановке.

2. Для возможности использования в расчетах на прочность зубчатых передач согласно стандарта ГОСТ 21354-87 принцип линейного суммирования повреждений были исследованы законы, которым подчиняются как изменение характера нагружения зубчатых передач в процессе работы, так и показатель интенсивности режима их нагружения. По результатам статистических исследований, выполненных для силового редуктора чистой клетки № 5 НТЛС 1680 ЦГПТЛ ПАО «Запорожсталь», показано, что характер внешней нагрузки, действующей на зубья зацепления, подчиняется нормальному закону распределения, а показатель интенсивности нагружения зубьев соответствует типовому среднему равновероятному режиму.

3. Результат статистических исследований позволяет в расчетах на прочность использовать принцип суперпозиции при оценке накопленных повреждений, и, следовательно, реализовывать условие их линейного суммирования. Мониторинг накопленных повреждений позволяет планировать ремонтные работы, связанные с обслуживанием зубчатой передачи.

4. Полученные результаты статистических исследований могут быть успешно использованы при оценке надежности работы и других узлов прокатного оборудования, так как условия нагружения силового редуктора можно считать интегральным показателем работы всего стана в целом.

5. В случае, когда доминирующими видами разрушения зубчатого сопряжения выступают молекулярно-механическое, приводящее к схватыванию и заеданию, и коррозионно-механическое, приводящее к фреттингкоррозии, предельное состояние зубчатого зацепления можно оценивать по износу боковой поверхности зубьев, которая влияет на величину люфта в зацеплении. При такой постановке задачи становится возможным контроль износа зубьев осуществлять без разборки зубчатого сопряжения, а, следовательно, для крупногабаритных узлов, разборка которых является весьма трудоемкой и длительной операцией, существенно сократить расходы на проведение работ по контролю износа зубьев и осуществлять его с любой периодичностью.

6. Реализация данного метода нашла применение в измерительном комплексе, адаптированном к зубчатым муфтам главных приводов клетей НТЛС 1680 ЦПТЛ ПАО «Запорожсталь», которые охватывают диапазон МЗП-15, МЗП-16 МЗ-20, МЗ-21, МЗ-23. При условии мониторинга величины износа боковой поверхности зубьев, которая осуществляется фиксацией холостого хода в сопряжении, и используя принцип линейного суммирования, а также сопоставительный анализ динамики износа, становится возможным по законам экстраполяции определить остаточный ресурс работы зубчатой муфты и, следовательно, предотвратить аварийные остановки стана.

7. Предложенный измерительный комплекс можно рассматривать как базовую модель прибора, предназначенного для объективной фиксации технического состояния зубчатого зацепления в режиме «online» для прокатного и другого металлургического оборудования.

#### Список литературы

1. ГОСТ 21354-87. Передачи зубчатые цилиндрические эвольвентные внешнего зацепления. Расчет на прочность. – Москва : Изд-во стандартов, 1988. – 127 с.
2. Дисонсон Н., Лион Ф. Статистика и планирование в технике. – Москва : Мир, 1981. – 385 с.
3. Кудрявцев В.Н. Детали машин. – Ленинград : Машиностроение, 1980. – 464 с.
4. Решетов Д.Н. Детали машин. – Москва : Машиностроение, 1989. – 496 с.
5. Притыкин Д.П. Надежность, ремонт и монтаж металлургического оборудования. – Москва : Металлургия, 1985. – 368 с.
6. Айрапетов Э.Л., Мирзаджанов Д.Б. Зубчатые соединительные муфты. – Москва : Наука, 1991. – 249 с.

#### References (transliterated)

1. GOST 21354-87. Peredachi zubchatyie tsilindricheskie evolventnyie vneshnego zatsepleniya. Raschet na prochnost. [Cylindrical gears involute external engagement. Calculation of the strength]. – Moscow : Publishing House of Standards, 1988. – 127 p.
2. Disonson N., Lion F. Statistika i planirovanie v tehnikе. [Statistics and planning in the technique] – Moscow : Mir Publ., 1981. – 385 p.
3. Kudryavtsev V.N. Detali mashin [A detail of machines] – Leningrad : Mashinostroenie Publ., 1980. – 464 p.
4. Rechetov D.N. Detali mashin. [A detail of machines] – Moscow.: Mashinostroenie Publ., 1989. – 496 p.
5. Pritikin D.P. Nadezhnost, remont i montazh metallurgicheskogo oborudovaniya [Reliability, repair and installation of metallurgical equipment]. – Moscow : Metallurgy Publ., 1985. – 368 p.
6. Airapetov E.L., Mirzajanov D.B. Zubchatyie soedinitelnyie mufty [Gear couplings] – Moscow : Nauka Publ., 1991. – 249 p.

Поступила (received) 30.10.2016

#### Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

**Анализ работы зубчатых передач и пути предупреждения их аварийных отказов на непрерывном тонколистовом стане горячей прокатки 1680 ПАО «Запорожсталь» / Ю. Д. Музыкин, С. В. Мацко, П. П. Москаленко, В. В. Татьков // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – № 30(1202). – С. 42–48. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2519-2671**

**Аналіз роботи зубчатих передач та шляхи попередження їх аварійних відмов на безперервному тонколистовому стані гарячої прокатки 1680 ПАТ «Запоріжсталь» / Ю. Д. Музикін, С. В. Мацко, П. П. Москаленко, В. В. Татьков // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – № 30(1202). – С. 42–48. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2519-2671**

**Analysis of gear transmissions and ways to prevent their accidental failures in a continuous sheet hot rolling mill 1680 JSC "Zaporizhstal" / Y. D. Muzykin, S. V. Matsko, P. P. Moskalenko, V. V. Tatkov // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy. – Kharkiv: NTU «KhPI» – 2016. – No 30 (1202). – P. 42–48. – Bibliogr.: 6 – ISSN 2519-2671**

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Музыкин Юрий Дмитриевич** – кандидат технических наук, профессор, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», профессор кафедры «Детали машин и прикладная механика»; тел.:(050)707-62-51; e-mail: muzykin1940@mail.ru

**Музикін Юрій Дмитрович** – кандидат технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри «Деталі машин та прикладна механіка»; тел.:(050)707-62-51; e-mail: muzykin1940@mail.ru

**Muzykin Yuri Dmitrievich** – Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Professor, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Professor of the Department «Machine parts and Applied Mechanics»; tel.:(050)707-62-51; e-mail: muzykin1940@mail.ru

**Мацко Сергей Владимирович**, начальник цеха горячей прокатки ПАО «Запорожсталь». г. Запорожье, Украина, тел.: +38-050-341-65-71; e-mail: matsko@zaporizhstal.com

**Мацко Сергій Володимирович**, начальник цеху гарячої прокатки ПАТ «Запоріжсталь». м.Запоріжжя, Україна, тел.: +38-050-341-65-71; e-mail: matsko@zaporizhstal.com

**Matsko Sergey Vladimirovich**, head hot rolling shop Public Joint Stock Company "Zaporizhstal". Zaporozhye, Ukraine, tel.: +38-050-341-65-71; e-mail: matsko@zaporizhstal.com

**Москаленко Павел Павлович**, заместитель главного механика по прокатному производству ПАО «Запорожсталь» г. Запорожье, Украина

**Москаленко Павло Павлович**, заступник головного механіка по прокатному виробництву ПАТ «Запоріжсталь» м.Запоріжжя, Україна

**Moskalenko Pavel Pavlovich**, the deputy chief engineer for rolling production of Public Joint Stock Company "Zaporizhstal" Zaporozhye, Ukraine

**Татков Владимир Викторович**, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник научно-исследовательской части Национального технического университета «Харьковский политехнический институт». тел. +38-067-735-87-09; e-mail: tatjkov@kpi.kharkov.ua

**Татков Володимир Вікторович**, кандидат технічних наук, провідний науковий співробітник науково-дослідної частини Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», тел.: +38-067-735-87-09; e-mail: tatjkov@kpi.kharkov.ua

**Tatkov Vladimir Viktorovich**, Candidate of Technical Sciences (Ph.D), leading researcher of research of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute". tel. +38-067-735-87-09; e-mail: tatjkov@kpi.kharkov.ua



УДК 621.923

**Ф. В. НОВИКОВ, В. И. ПОЛЯНСКИЙ, С. А. ДИТИНЕНКО****ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ  
МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ОТВЕРСТИЙ**

Аналитически обоснованы условия повышения точности механической обработки отверстия в случае его несоосности с осевым многолезвийным инструментом с учетом упругого перемещения, возникающего в технологической системе. Показано, что увеличение количества лезвий осевого многолезвийного инструмента не позволяет уменьшить упругое перемещение и погрешность обработки отверстия. Целесообразно использовать развертки с разнонаклонными зубьями, снижающие интенсивность колебаний и повышающие точность обработки путем исключения работы "по следу".

**Ключевые слова:** механическая обработка отверстия, точность обработки, осевой многолезвийный инструмент, количество лезвий инструмента, упругое перемещение, погрешность обработки, развертки с разнонаклонными зубьями.

Аналітично обґрунтовано умови підвищення точності механічної обробки отвору в разі його неспіввісності з осьовим багатолезовим інструментом з урахуванням пружного переміщення, що виникає в технологічній системі. Показано, що збільшення кількості лез осевого багатолезового інструмента не дозволяє зменшити пружне переміщення і похибку обробки отвору. Доцільно використовувати розвертки з різнопохилими зубами, які знижують інтенсивність коливань і підвищують точність обробки шляхом виключення роботи "по сліду".

**Ключові слова:** механічна обробка отвору, точність обробки, осьовий багатолезовий інструмент, кількість лез інструмента, пружне переміщення, похибка обробки, розвертки з різнопохилими зубами.

Improving the accuracy of machining of holes is an urgent task of modern engineering. This applies in particular to the manufacture of high-precision holes in parts of hydraulic equipment, and other products. Currently, practical experience gained great precision machining of holes, in particular with modern methods abrading. Analytically grounded process conditions increase the accuracy of machining holes in the case of axial misalignment multiblade tool based on the magnitude of the elastic movement occurring in the process system. It is shown that increasing the number of blades of the axial multiblade tool actually does not affect the value of the maximum elastic movements. It was also found that the error of the axial hole machining multiblade tools with inclined blades is the same as in the processing of the axial hole multiblade tools with straight blades. Therefore it is difficult to reduce the hole machining accuracy by increasing the number of multiple tip tool blades. It is advisable to use the scanner with raznokononny teeth that reduce the intensity of the vibrations and improve machining accuracy by eliminating the work "on the trail". Errors of processing in this case will be determined by the elastic movements arising in technology-cal system.

**Keywords:** machining of holes, precision machining, axis multiblade tool number of tool blades, elastic movement, error handling, scanning with raznokononny teeth.

**Введение.** Повышение точности механической обработки отверстий является актуальной задачей современного машиностроения. В особенности это относится к изготовлению высокоточных отверстий в деталях гидроаппаратуры и других изделиях. В настоящее время накоплен большой практический опыт обработки высокоточных отверстий, в частности, с применением современных методов абразивной обработки. Однако, существуют значительные технологические возможности обеспечения высокоточной обработки отверстий осевыми многолезвийными инструментами (развертками). Поэтому настоящая работа посвящена изысканию новых технологических возможностей повышения точности обработки отверстий осевыми многолезвийными инструментами.

**Анализ последних исследований и публикаций.** В работах [1–3] установлено, что точность механической обработки отверстия обусловлена несоосностью осевых многолезвийных инструментов, которая вызывает образование в технологической системе упругих перемещений и колебаний. Для их уменьшения, а в отдельных случаях и устранения, применяют развертки с разнонаклонными зубьями [4], которые фактически исключают работу "по следу". Поэтому важно аналитически определить влияние несоосности

обрабатываемого отверстия и осевого многолезвийного инструмента на величину упругого перемещения в технологической системе и условия его уменьшения с целью выявления новых технологических возможностей повышения точности механической обработки отверстий.

**Цель работы** – аналитическое определение технологических условий повышения точности механической обработки отверстий.

**Изложение основного материала.** Для решения поставленной задачи следует воспользоваться аналитическими зависимостями [5, 6] для определения упругого перемещения  $y$ , возникающего в технологической системе, при рассверливании отверстия с учетом несоосного расположения обрабатываемого отверстия радиусом  $r$  и инструмента радиусом  $R$  (рис. 1):

$$y = \frac{(t_1 - t_2)}{\left(2 + \frac{2 \cdot c \cdot K_{pez}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}\right)} = \frac{\Delta \cdot \cos \alpha}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{pez}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}\right)}, \quad (1)$$

где  $c$  – жесткость технологической системы, Н/м;  
 $\sigma$  – условное напряжение резания, Н/м<sup>2</sup>;

$$K_{рез} = P_{z1} / P_{y1} = P_{z2} / P_{y2};$$

$P_{z1}$ ,  $P_{z2}$ ,  $P_{y1}$ ,  $P_{y2}$  – тангенциальные и радиальные составляющие силы резания, действующие на оба лезвия сверла, Н;

$S$  – подача, м/об;

$t_1$ ,  $t_2$  – глубины резания, приходящиеся на оба лезвия сверла, м;

$\varphi$  – половина главного угла сверла в плане;

$\Delta$  – сдвиг оси сверла относительно оси обрабатываемого отверстия, м;

$\alpha$  – угол положения лезвий сверла.

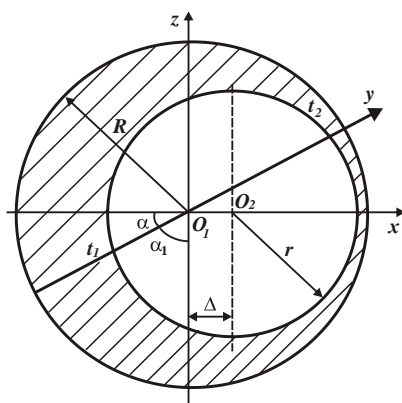


Рис. 1 – Расчетная схема погрешности обработки отверстия при рассверливании

Решение получено в полярной системе координат с координатами  $y$  и  $\alpha$ . Положение осей инструмента  $O_1$  и обрабатываемого отверстия  $O_2$  рассмотрено в декартовой системе координат  $xoz$ . Как видно, максимальное упругое перемещение  $y$  достигается при угле  $\alpha = 0$ .

При обработке отверстия зенкером, имеющим 3 лезвия, наибольшая погрешность обработки будет достигаться вдоль координаты  $ox$  при осесимметричном расположении лезвий инструмента (рис. 2, а, б). В первом случае радиальные составляющие силы резания, действующие на каждое из трех лезвий инструмента, определяются следующими зависимостями:

$$P_{y1} = P_{y2} = \frac{\sigma \cdot S \cdot t_{1\phi} \cdot \cos \varphi}{3 \cdot K_{рез}}; P_{y3} = \frac{\sigma \cdot S \cdot t_{3\phi} \cdot \cos \varphi}{3 \cdot K_{рез}}.$$

Под действием этих сил ось инструмента (точка  $O_1$  на рис. 1) переместится вдоль координаты  $ox$  на величину упругого перемещения  $y$ . По сути, это соответствует уменьшению величины  $\Delta$  на величину  $y$ . Тогда текущая фактическая глубина резания  $t_{1\phi}$ , приходящаяся на лезвие (зуб)

инструмента, будет определяться зависимостью [7], рассматривая в ней вместо величины  $\Delta$  величину  $(\Delta - y)$ , т.е.

$$t_{1\phi} = R - \sqrt{(\Delta - y)^2 \cos^2 \alpha + r^2 - (\Delta - y)^2} + (\Delta - y) \cos \alpha. (2)$$

При угле  $\alpha = 60^\circ$  с учетом  $r \gg (\Delta - y)$  зависимость (2) упростится и примет вид:

$$t_{1\phi} = R - r + 0,5 \cdot (\Delta - y). (3)$$

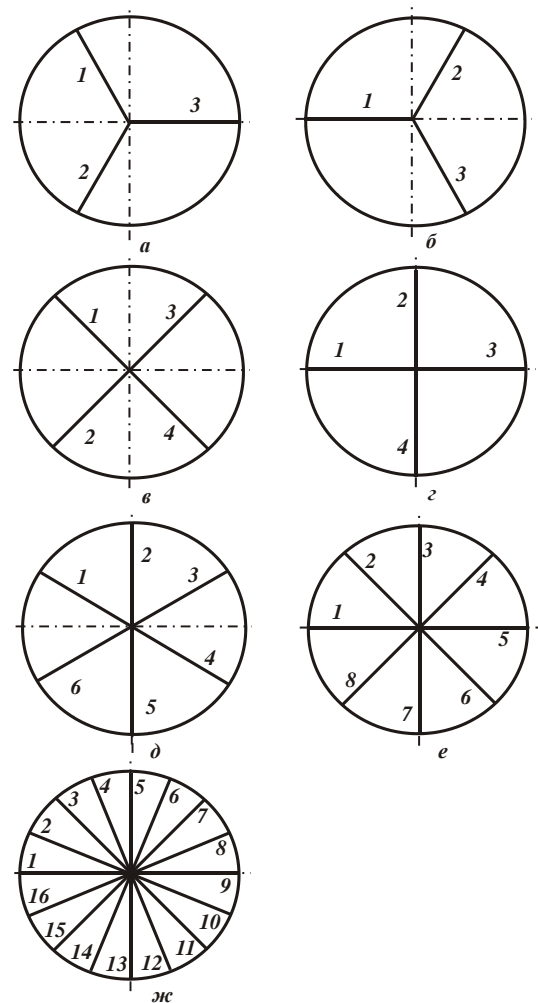


Рис. 2 – Схемы расположения лезвий инструмента: а – радиальные составляющие силы резания; б – осевой инструмент с 3 лезвиями; в – осевой инструмент с 4 лезвиями; г – величина упругого перемещения формируется под действием радиальных составляющих силы резания  $P_{y1}$ ; д – осевой инструмент с 6 лезвиями; е – осевой инструмент с 8 лезвиями; ж – осевой инструмент с 16 лезвиями

Соответственно, текущая фактическая глубина резания  $t_{3\phi}$  будет определяться зависимостью,

приведенной в работе [7], принимая в ней вместо величины  $\Delta$  величину  $(\Delta - y)$ , т.е.

$$t_{3\phi} = R - (\Delta - y) \cos \alpha - \sqrt{(\Delta - y)^2 \cos^2 \alpha + r^2 - (\Delta - y)^2}. \quad (4)$$

При угле  $\alpha = 0^\circ$  с учетом  $r \gg (\Delta - y)$  зависимость (4) упростится:

$$t_{3\phi} = R - r - (\Delta - y). \quad (5)$$

Поскольку перемещение оси инструмента происходит вдоль координаты  $ox$ , то необходимо рассматривать проекции сил  $P_{y1}$  и  $P_{y2}$  на координату  $ox$  при угле  $\alpha = 60^\circ$ :

$$(P_{y1})_x = (P_{y2})_x = P_{y1} \cdot \cos \alpha = 0,5 \cdot P_{y1}. \quad (6)$$

Тогда упругое перемещение  $y$  определится:

$$y = \frac{2 \cdot (P_{y1})_x - P_{y3}}{c} = \frac{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}{2 \cdot c \cdot K_{pez}} \cdot (\Delta - y), \quad (7)$$

где  $(t_{1\phi} - t_{3\phi}) = 1,5 \cdot (\Delta - y)$ .

Разрешая полученное уравнение (7) относительно неизвестной величины  $y$  (рис. 2, а), получено:

$$y = \frac{\Delta}{\left(1 + \frac{2 \cdot c \cdot K_{pez}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}\right)}. \quad (8)$$

Для случая, показанного на рис. 2, б, радиальные составляющие силы резания, действующие на каждое из трех лезвий, определяются зависимостями:

$$P_{y1} = \frac{\sigma \cdot S \cdot t_{1\phi} \cdot \cos \varphi}{3 \cdot K_{pez}}, \quad P_{y2} = P_{y3} = \frac{\sigma \cdot S \cdot t_{2\phi} \cdot \cos \varphi}{3 \cdot K_{pez}}.$$

Как и в первом случае, под действием этих трех сил ось инструмента (точка  $O_I$  на рис. 1) переместится вдоль координаты  $ox$  на величину упругого перемещения  $y$ , что эквивалентно уменьшению величины  $\Delta$  на величину  $y$ . Тогда текущая фактическая глубина резания  $t_{1\phi}$ , приходящаяся на лезвие (зуб) инструмента, будет определяться зависимостью, приведенной в работе [7], рассматривая в ней вместо величины  $\Delta$  величину  $(\Delta - y)$  для  $\alpha = 0^\circ$  с учетом  $r \gg (\Delta - y)$ :

$$t_{1\phi} = R - r + (\Delta - y). \quad (9)$$

Соответственно, текущая фактическая глубина резания  $t_{2\phi}$  будет определяться зависимостью,

приведенной в работе [7], принимая в ней вместо величины  $\Delta$  величину  $(\Delta - y)$  для  $\alpha = 60^\circ$ :

$$t_{2\phi} = R - r - 0,5 \cdot (\Delta - y). \quad (10)$$

Проекция сил  $P_{y2}$  и  $P_{y3}$  на координату  $ox$  при угле  $\alpha = 60^\circ$  равны:

$$(P_{y2})_x = (P_{y3})_x = P_{y2} \cdot \cos \alpha = 0,5 \cdot P_{y2}. \quad (11)$$

Величина упругого перемещения  $y$  определится:

$$y = \frac{P_{y1} - 2 \cdot (P_{y2})_x}{c} = \frac{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}{3 \cdot c \cdot K_{pez}} \cdot 1,5 \cdot (\Delta - y). \quad (12)$$

Разрешая полученное уравнение (12) относительно неизвестной величины  $y$  (рис. 2, б), имеем

$$y = \frac{\Delta}{\left(1 + \frac{2 \cdot c \cdot K_{pez}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}\right)}. \quad (13)$$

Как видно, зависимости (8) и (13) идентичны. Сравнивая их с аналогичной зависимостью (1), полученной при обработке отверстия инструментом с двумя лезвиями (сверлом), видно, что при обработке отверстия инструментом с тремя лезвиями величина упругого перемещения  $y$  меньше, т.к. больше знаменатель зависимости (13). Это указывает на эффективность применения операции зенкерования отверстия после его рассверливания с точки зрения уменьшения погрешности обработки отверстия. Однако, эффект будет достигаться при условии, когда второе слагаемое знаменателя в зависимости (13) будет больше единицы. В противном случае  $y \rightarrow \Delta$ .

При обработке отверстия осевым инструментом (зенкером), имеющим 4 лезвия, наибольшая погрешность обработки, очевидно, будет достигаться вдоль координаты  $ox$  при осесимметричном расположении лезвий инструмента (рис. 2, в, г). В первом случае радиальные составляющие силы резания, действующие на каждое из четырех лезвий инструмента, соответственно определяются зависимостями:

$$P_{y1} = P_{y2} = \frac{\sigma \cdot S \cdot t_{1\phi} \cdot \cos \varphi}{4 \cdot K_{pez}};$$

$$P_{y3} = P_{y4} = \frac{\sigma \cdot S \cdot t_{3\phi} \cdot \cos \varphi}{4 \cdot K_{pez}}.$$

Под действием этих сил ось инструмента (точка  $O_I$  на рис. 1) переместится вдоль координаты  $ox$  на величину  $y$ , что эквивалентно уменьшению величины  $\Delta$  на величину  $y$ . Тогда текущие фактические

глибини резания  $t_{1\phi}$  и  $t_{3\phi}$ , приходящиеся на лезвие (зуб) инструмента, будут определяться зависимостями:

$$t_{1\phi} = R - \sqrt{(\Delta - y)^2 \cos^2 \alpha + r^2 - (\Delta - y)^2} + (\Delta - y) \cos \alpha \approx R - r + 0,707(\Delta - y); \quad (14)$$

$$t_{3\phi} = R - (\Delta - y) \cos \alpha - \sqrt{(\Delta - y)^2 \cos^2 \alpha + r^2 - (\Delta - y)^2} \approx R - r - 0,707(\Delta - y). \quad (15)$$

Проекции сил  $P_{y1}$ ,  $P_{y2}$ ,  $P_{y3}$  и  $P_{y4}$  на координату  $ox$  при угле  $\alpha = 45^\circ$ :

$$(P_{y1})_x = (P_{y2})_x = P_{y1} \cdot \cos \alpha = 0,707 \cdot P_{y1}; \\ (P_{y3})_x = (P_{y4})_x = P_{y3} \cdot \cos \alpha = 0,707 \cdot P_{y3}. \quad (16)$$

Величина упругого перемещения  $y$  определится:

$$y = \frac{2(P_{y1})_x - 2(P_{y3})_x}{c} = \frac{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}{2c \cdot K_{pez}} (\Delta - y). \quad (17)$$

Разрешая полученное уравнение (17) относительно неизвестной величины  $y$  (рис. 2, в), имеем:

$$y = \frac{\Delta}{\left(1 + \frac{2 \cdot c \cdot K_{pez}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}\right)}. \quad (18)$$

При расположении лезвий инструмента, показанном на рис. 2, г, величина упругого перемещения  $y$  будет формироваться под действием лишь радиальных составляющих силы резания  $P_{y1}$  и  $P_{y3}$ , т.е.

$$P_{y1} = \frac{\sigma \cdot S \cdot t_{1\phi} \cdot \cos \varphi}{4 \cdot K_{pez}}; \quad P_{y3} = \frac{\sigma \cdot S \cdot t_{3\phi} \cdot \cos \varphi}{4 \cdot K_{pez}}.$$

Величина упругого перемещения  $y$  выразится:

$$y = \frac{P_{y1} - P_{y3}}{c} = \frac{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}{4 \cdot c \cdot K_{pez}} \cdot (t_{1\phi} - t_{3\phi}). \quad (19)$$

С учетом  $(t_{1\phi} - t_{3\phi}) = 2 \cdot (\Delta - y)$  имеем

$$y = \frac{\Delta}{\left(1 + \frac{2 \cdot c \cdot K_{pez}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}\right)}. \quad (20)$$

Как видно, зависимости (18) и (20) идентичны. Сравнивая их с аналогичной зависимостью (13),

полученной при обработке отверстия инструментом с тремя лезвиями, видно, что они также идентичны. Следовательно, увеличение количества лезвий осевого инструмента (зенкера) с трех до четырех не приводит к снижению упругого перемещения  $y$  и соответственно к снижению погрешности обработки отверстия, т.е. эффект повышения точности обработки отсутствует.

Используя полученные выше теоретические решения, оценим погрешность обработки отверстия осевым инструментом с 6 лезвиями для положения лезвий (рис. 2, д), которое, очевидно, будет определять наибольшую величину упругого перемещения  $y$ .

С учетом проекций радиальных составляющих силы резания  $P_{y1}$ ,  $P_{y3}$ ,  $P_{y4}$ ,  $P_{y6}$  на ось  $ox$  и условий  $P_{y1} = P_{y6}$  и  $P_{y3} = P_{y4}$ , величина  $y$  определится:

$$y = \frac{2 \cdot (P_{y1} - P_{y4}) \cdot \cos 30^\circ}{c} = \frac{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}{2 \cdot c \cdot K_{pez}} \cdot (\Delta - y), \quad (21)$$

где  $P_{y1} = \frac{\sigma \cdot S \cdot t_{1\phi} \cdot \cos \varphi}{6 \cdot K_{pez}};$

$$P_{y4} = \frac{\sigma \cdot S \cdot t_{4\phi} \cdot \cos \varphi}{6 \cdot K_{pez}};$$

$$t_{1\phi} - t_{4\phi} = 2 \cdot (\Delta - y) \cdot \cos 30^\circ.$$

Откуда

$$y = \frac{\Delta}{\left(1 + \frac{2 \cdot c \cdot K_{pez}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}\right)}. \quad (22)$$

Как видно, зависимость (22) идентична зависимостям (13) и (20), т.е. обработка отверстия осевым многолезвийным инструментом с 6 лезвиями приводит к возникновению в технологической системе такой же величины упругого перемещения  $y$  как и обработка отверстия инструментом с 3 и 4 лезвиями.

При обработке отверстия осевым инструментом с восемью лезвиями (рис. 2, е) величина упругого перемещения  $y$  будет формироваться под действием радиальных составляющих силы резания  $P_{y1}, \dots, P_{y8}$ . С учетом  $P_{y2} = P_{y8}; P_{y4} = P_{y6}; t_{1\phi} = R - r + (\Delta - y); t_{5\phi} = R - r - (\Delta - y); t_{2\phi} = R - r + (\Delta - y) \cdot \cos \alpha; t_{4\phi} = R - r - (\Delta - y) \cdot \cos \alpha$  и  $i = 1 \dots 8$  величина упругого перемещения  $y$  с учетом  $\alpha = 45^\circ$  определится:

$$y = \frac{(P_{y1} - P_{y5}) + 2 \cdot (P_{y2} - P_{y4}) \cdot \cos \alpha}{c}, \quad (23)$$

$$\text{где } P_{yi} = \frac{\sigma \cdot S \cdot t_{i\phi} \cdot \cos \varphi}{8 \cdot K_{\text{рез}}}.$$

Разрешая уравнение (23) относительно величины  $y$ , приходим к зависимостям (13) и (22):

$$y = \frac{\Delta}{\left(1 + \frac{2 \cdot c \cdot K_{\text{рез}}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}\right)}. \quad (24)$$

Таким образом показано, что увеличение количества лезвий осевого многолезвийного

$$y = \frac{(P_{y1} - P_{y9}) + 2(P_{y2} - P_{y10})\cos 22,5^0 + 2(P_{y3} - P_{y11})\cos 45^0 + 2(P_{y4} - P_{y12})\cos 67,5^0}{c} = \frac{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}{2 \cdot c \cdot K_{\text{рез}}} \cdot (\Delta - y), \quad (25)$$

$$\text{где } P_{y1} = \frac{\sigma \cdot S \cdot t_{1\phi} \cdot \cos \varphi}{16 \cdot K_{\text{рез}}}, \dots, P_{y2} = \frac{\sigma \cdot S \cdot t_{2\phi} \cdot \cos \varphi}{8 \cdot K_{\text{рез}}};$$

$$t_{1\phi} - t_{9\phi} = 2 \cdot (\Delta - y) \cdot \cos 0^0;$$

$$t_{2\phi} - t_{10\phi} = 2 \cdot (\Delta - y) \cdot \cos 22,5^0;$$

$$t_{3\phi} - t_{11\phi} = 2 \cdot (\Delta - y) \cdot \cos 45^0;$$

$$t_{4\phi} - t_{12\phi} = 2 \cdot (\Delta - y) \cdot \cos 67,5^0.$$

Разрешая уравнение (25) относительно величины  $y$ , приходим к зависимости (24):

$$y = \frac{\Delta}{\left(1 + \frac{2 \cdot c \cdot K_{\text{рез}}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}\right)}. \quad (26)$$

Следовательно, при обработке отверстия осевым многолезвийным инструментом с 8 и 16 лезвиями величина упругого перемещения  $y$  одинакова, т.е. добиться повышения точности обработки отверстия за счет увеличения количества лезвий с 3 до 16 затруднительно.

Рассмотрим погрешности обработки отверстия осевым многолезвийным инструментом с расположением лезвий под наклоном. В этом случае в расчетной схеме (рис. 1) следует рассматривать вместо сосредоточенной радиальной составляющей силы резания распределенную нагрузку  $q = P_y / l$ , действующую на определенном участке обрабатываемого отверстия длиной  $l = \frac{2\pi \cdot R \cdot \alpha}{360^0}$ ,

где  $\alpha$  – угол контакта лезвия осевого многолезвийного инструмента, расположенного под наклоном, с обрабатываемым материалом. Тогда при

инструмента с 3 до 8 не привело к снижению величины упругого перемещения  $y$ .

При обработке отверстия осевым инструментом с 16 лезвиями (рис. 2, ж) в формировании величины упругого перемещения  $y$  не будут принимать участие лишь 5-е и 13-е лезвия, поскольку проекции радиальных составляющих силы резания, возникающих от работы этих лезвий, на ось  $ox$  равны нулю. Тогда с учетом условий  $P_{y2} = P_{y16}$ ,  $P_{y3} = P_{y15}$ ,  $P_{y4} = P_{y14}$ ,  $P_{y6} = P_{y12}$ ,  $P_{y7} = P_{y11}$ ,  $P_{y8} = P_{y10}$  и проекций радиальных составляющих силы резания на ось  $ox$  величина упругого перемещения  $y$  определится:

обработке осевым инструментом с 4 наклонными лезвиями с учетом  $dl = R \cdot d\alpha$  величина  $y$  определится:

$$y = \frac{1}{c} \cdot \left[ \int_0^l (q_1 - q_3) \cdot \cos \alpha \cdot dl + \int_0^l (q_2 - q_4) \cdot \cos \alpha \cdot dl \right], \quad (27)$$

$$\text{где } (q_1 - q_3) = \frac{(P_{y1} - P_{y3})}{l};$$

$$(P_{y1} - P_{y3}) = \frac{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}{4 \cdot K_{\text{рез}}} \cdot 2 \cdot (\Delta - y) \cdot \cos \alpha.$$

Рассматривая пределы интегрирования в зависимости от угла  $\alpha$ , имеем:

$$y = \frac{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}{4 \cdot c \cdot K_{\text{рез}}} \cdot \frac{360^0}{\pi \cdot \alpha} \cdot (\Delta - y) \times \left[ \int_0^{\alpha} \cos^2 \alpha \cdot d\alpha + \int_{90^0 - \alpha}^{90^0} \cos^2 \alpha \cdot d\alpha \right]. \quad (28)$$

Откуда

$$y = \frac{\Delta}{\left(1 + \frac{2 \cdot c \cdot K_{\text{рез}}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}\right)}. \quad (29)$$

В итоге пришли к зависимости (24). Следовательно, погрешность обработки отверстия осевым многолезвийным инструментом с наклонными лезвиями такая же, как и при обработке отверстия осевым многолезвийным инструментом с прямыми лезвиями. Поэтому, как отмечалось выше, целесообразно использовать разноманклонными зубьями, которые позволяют уменьшить интенсивность колебаний и повысить точность обработки в результате исключения работы “по следу”. Погрешности

обработки в этом случае будут определяться упругими перемещениями, возникающими в технологической системе.

**Выводы.** Аналитически обоснованы технологические условия повышения точности механической обработки отверстия в случае его несоосности с осевым многолезвийным инструментом с учетом величины упругого перемещения, возникающего в технологической системе. Показано, что увеличение количества лезвий осевого многолезвийного инструмента фактически не влияет на величину максимального упругого перемещения. Установлено также, что погрешность обработки отверстия осевым многолезвийным инструментом с наклонными лезвиями такая же, как и при обработке отверстия осевым многолезвийным инструментом с прямыми лезвиями. Поэтому сложно уменьшить погрешности обработки отверстия путем увеличения количества лезвий многолезвийного инструмента. Целесообразно использовать развертки с разнонаклонными зубьями, которые позволяют уменьшить интенсивность колебаний и повысить точность обработки в результате исключения работы “по следу”. Погрешности обработки в этом случае будут определяться упругими перемещениями, возникающими в технологической системе.

#### Список литературы:

1. Маталин А.А. Точность механической обработки и проектирование технологических процессов / А.А. Маталин. – Москва: Машиностроение, 1970. – 390 с.
2. Колев К.С. Точность обработки и режимы резания / К.С. Колев, Л.М. Горчаков. – Москва: Машиностроение, 1976. – 144 с.
3. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В десяти томах. – Т. 1. «Механика резания материалов» – Одесса: ОНПУ, 2002. – 580 с.
4. Ештушенко В.А. Обработка отверстий в труднообрабатываемых материалах развертками с

разнонаклонными зубьями: дис. ... кандидата техн. наук: 05.03.01 / В.А. Ештушенко. – Киев: КПИ, 1986. – 260 с.

5. Иванов И.Е. Высокоэффективная технология изготовления резьбовых отверстий в горловинах баллонов на автоматических линиях: монография / И.Е. Иванов, Ф.В. Новиков, Е.И. Иванов. – Мариуполь: ПГТУ, 2011. – 209 с.

6. Брижан Т.М. Теоретический анализ условий повышения точности обработки отверстий осевыми многолезвийными инструментами / Т. М. Брижан // Вісник Приазовського державного технічного університету: зб. наук. праць. Серія: Технічні науки. – Мариуполь: ПДТУ, 2014. – Вип. 29. – С. 160–168.

7. Брижан Т. М. Математическая модель определения закономерностей формирования погрешностей механической обработки отверстий / Т. М. Брижан // Вісник Приазовського державного технічного університету: зб. наук. праць. Серія: Технічні науки. – Мариуполь: ПДТУ, 2014. – Вип. 28. – С. 167–173.

#### References (transliterated)

1. Matalin A.A. *Tothnost mekhanicheskoy obrabotki i proektirovaniye technologicheskikh protsessov* [Accuracy of machining processes and design]. – Moscow: Mashinostroenie Publ., 1970. – 390 p.
2. Kolev K.S. *Tothnost obrabotki i rezhimy rezaniya* [Precision machining and cutting conditions]. – Moscow: Mashinostroenie Publ., 1976. – 144 p.
3. *Fiziko-matematicheskaya teoriya protsessov obrabotki materialov i tekhnologii mashinostroeniya* [Physical and mathematical theory of processing materials and manufacturing engineering]. – V 10 tomakh. – Odessa: ONPU. – Vol. 1. "Mechanika rezaniya materialov. – 580 p.
4. Evtuchenko V.A. *Obrabotka otverstiy v trudnoobrabatyvaemykh materialakh razvertkami s raznonaklonnyimi zub'yami*: dis. ... kand. techn. nauk: 05.03.01 / V.A. Evtuchenko. – Kiev: KPI, 1986. – 260 p.
5. Ivanov I.E. *Vysokoeffektivnaya tekhnologiya izgotovleniya rezbovych otverstiy v gorlovinach ballonov na avtomaticheskikh liniyach: monografiya* [High-technology manufacturing threaded holes in the neck of bottles on automatic lines]. – Mariupol: PGU, 2011. – 209 p.
6. Brizhan T.M. *Teoreticheskiy analiz usloviy povycheniya tothnosti obrabotki otverstiy osevnymi mnogolezviynymi instrumentami* [Theoretical analysis of the conditions for increasing the precision machining of holes multiblade axial tools]. // Visnyk Pryazovskogo derzhavnogo technichnogo universytetu: zb. nauk. prats. Seriya: Technichni nauki. – Mariupol: PDTU, 2014. – Vyp. 29. – P. 160–168.
7. Brizhan T.M. *Matematicheskaya model opredeleniya zakonornostey formirovaniya pogrechnostey mekhanicheskoy obrabotki otverstiy* [A mathematical model for determining the laws of formation of the errors of machining holes]. // Visnyk Pryazovskogo derzhavnogo technichnogo universytetu: zb. nauk. prats. Seriya: Technichni nauki. – Mariupol: PDTU, 2014. – Vyp. 28. – p. 167–173.

Поступила (received) 02.11.2016

#### Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

**Технологические условия повышения точности механической обработки отверстий / Ф. В. Новиков, В. И. Полянский, С. А. Дитиненко** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – № 30(1202). – С. 49–55. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2519-2671

**Технологічні умови підвищення точності механічної обробки отворів / Ф. В. Новіков, В. І. Полянський, С. О. Дитиненко** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – № 30(1202). – С. 49–55. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2519-2671

**Technological conditions of improvement of precision machining of holes / F. V. Novikov, V. I. Polyanskiy, S. A. Ditenko** // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy. – Kharkiv: NTU «KhPI» – 2016. – No 30 (1202). – P. 49–55. – Bibliogr.: 7 – ISSN 2519-2671



## Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Новиков Федор Васильевич** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Естественные науки и технологии» Харьковского национального экономического университета имени Семена Кузнеця, г. Харьков; тел.: (0572) 69-55-62; e-mail: fokusnic1@rambler.ru.

**Новіков Федір Васильович** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Природничі науки та технології» Харківського національного економічного університету імені Семена Кузнеця, м. Харків; тел.: (0572) 69-55-62; e-mail: fokusnic1@rambler.ru.

**Novikov Fedor Vasiliviyth** – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Head of Department of "Science and Technology" Kharkiv National Economic University named after Semen Kuznets, Kharkiv; tel. : (0572) 69-55-62; e-mail: fokusnic1@rambler.ru/

**Полянский Владимир Иванович** – кандидат технических наук, Генеральный директор, ООО «Империя металлов», г. Харьков; тел.: +38-067-57-80-906; e-mail: tools@imperija.com.

**Полянський Володимир Іванович** – кандидат технічних наук, Генеральний директор, ТОВ «Імперія металів», м. Харків; тел.: +38-067-57-80-906; e-mail: tools@imperija.com.

**Polyansky Vladimir Ivanovich** – Candidate of Technical Sciences, General Director of LLC "Empire Metals", Kharkov; tel. : +38-067-57-80-906; e-mail: tools@imperija.com.

**Дитиненко Станислав Александрович** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Естественные науки и технологии» Харьковского национального экономического университета имени Семена Кузнеця, г. Харьков; тел.: (057) 702-02-65 (доп. 328); e-mail: kافتtech@hneu.edu.ua.

**Дитиненко Станіслав Олександрович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри «Природничі науки та технології» Харківського національного економічного університету імені Семена Кузнеця, м. Харків; тел.: (057) 702-02-65 (доп. 328); e-mail: kافتtech@hneu.edu.ua.

**Ditinenko Stanislav Aleksandrovich** – PhD, associate professor of "Science and Technology" Kharkiv National Economic University named after Semen Kuznets on Kharkiv; tel. (057) 702-02-65 (dop. 328); e-mail: kافتtech@hneu.edu.ua.

УДК 621.9.048.4

В. І. НОСУЛЕНКО, В. М. ШМЕЛЬОВ, В. В. ЮР'ЄВ

### КРИТЕРІЙ СКЛАДНОСТІ ОТВОРІВ ЯК ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ФАКТОР В УМОВАХ РОД

При розробці технологічного процесу виготовлення отворів, для забезпечення необхідної продуктивності та якості обробки, необхідно враховувати технологічні особливості процесу РОД, зокрема за умов обробки отворів з розвиненим, складним периметром. В цьому випадку доцільно описати відповідним чином що так звану складність отвору. Для цього введемо поняття критерію складності отворів  $K$  як технологічного фактора в умовах РОД, що в відомих межах визначає область раціонального застосування однієї з наведених технологічних схем формоутворення.

**Ключові слова:** електрична дуга, розмірна обробка електричною дугою, складний контур, електрод-інструмент, заготовка, формоутворення.

При разработке технологического процесса изготовления отверстий, для обеспечения требуемой производительности и качества обработки, необходимо учитывать технологические особенности процесса РОД, в частности по условиям обработки отверстий с развитым, сложным периметром. В этом случае целесообразно описать соответствующим образом эту так называемую сложность проема. Для этого введем понятие критерия сложности отверстий  $K$  как технологического фактора в условиях РОД, что в известных границах определяет область рационального применения одного из приведенных технологических схем формообразования.

**Ключевые слова:** электрическая дуга, размерная обработка электрической дугой, сложный контур, электрод-инструмент, заготовки, формообразование.

For holes for simple contour shapes using known way dimensional processing electric arc on the principle of insertion of the electrode-tool with a hole in the center, with pumping fluid in the direction from the periphery to the center and continue through the hole to drain. To stabilize the process and its exclusion violations are evident in the processing of asymmetric and large surfaces with multi-processing, using multisection electrode sufficient to hydraulic resistance on all lines leak of working fluid was possible minimal and roughly the same, which track pumping working fluid through the interelectrode gap should be as minimal and roughly the same. When developing the technological process of manufacture of the holes, to ensure the required performance and quality processing, it is necessary to consider technological features of the process of the arc dimensional processing (ADM), in particular on the conditions of processing of holes with a developed, complex perimeter. In this case, it is appropriate to describe appropriately this so-called complexity gap. For this we introduce the notion of level of difficulty of holes as a technological factor in a ADM that determines the boundaries of the field of rational application of one of the technological schemes of forming.

**Keywords:** electric arc, dimensional processing of electric arc, a complex circuit, the electrode tool, workpiece, forming.

**Вступ.** Для отримання отворів простих за контуром форм застосовують відомий спосіб розмірної обробки електричною дугою (РОД) [1] по принципу прошивання електродом-інструментом (ЕІ) з отвором по центру ЕІ (рис. 1) [2], з прокачуванням робочої рідини в напрямку від периферії ЕІ до його центру і надалі через отвір в ЕІ на злив.

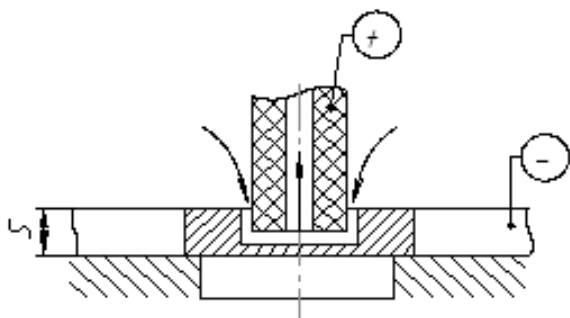


Рис. 1 – Технологічна схема процесу формоутворення при прокачуванні робочої рідини через отвір в ЕІ

Для обробки отворів з розвиненим (складним по контуру) периметром зазначена технологічна схема формоутворення не може бути використана в зв'язку з неможливістю забезпечення рівномірної течії робочої рідини по периметру обробки. Як наслідок, такий процес неможливо реалізувати технологічно, оскільки енергетичні характеристики розряду

(густина сили струму, напруженість електричного поля), а отже і технологічні характеристики процесу РОД продуктивність обробки  $M$ , шорсткість обробленої поверхні  $Ra$ , відносний лінійний знос  $EI$   $\gamma$  та бічний міжелектродний зазор  $\delta$  визначаються перш за все динамічним тиском  $P_d$  потоку робочої рідини, який за зазначених умов є по суті некерованим по периметру обробки [3]. За цих умов процес обробки стає не стабільним (рис. 2), енергетичні характеристики дуги стають близькі до енергетичних характеристик звичайних зварювальних дуг. Як наслідок така дуга псує оброблювану поверхню.

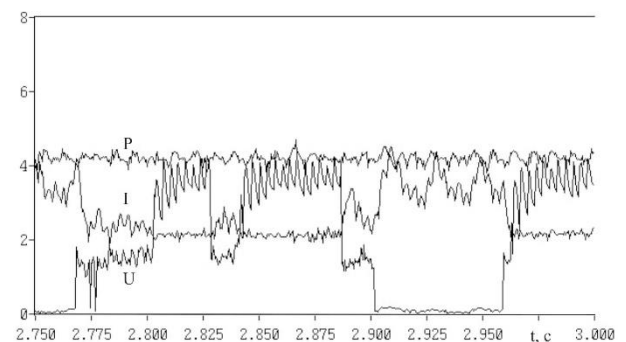


Рис. 2 – Осцилограма нестабільного процесу РОД

Для стабілізації процесу і виключення його порушень, що особливо виявляється при обробці несиметричних і великих поверхонь, при

багатоелектродній обробці, при використанні багатосекційних електродів і т. і., достатньо щоб гідравлічний опір на всіх лініях течі робочої рідини був по можливості мінімальним і приблизно однаковим, для чого траси прокачування робочої рідини через міжелектродний зазор повинні бути по можливості мінімальними і приблизно однаковими. Для цього робочу поверхню ЕІ або заготовки поділяють на кремлі ділянки прокачування, які повинні наближатися до круглих чи квадратних в плані.

На рис. 3 наведено приклад технологічної схеми, коли в ЕІ попередньо просвердлюють декілька отворів для відведення робочої рідини з кроком, що забезпечує приблизно однакову довжину траси течії робочої рідини і що дозволяє вирівняти динамічний тиск потоку робочої рідини по периметру обробки та забезпечити її якість.

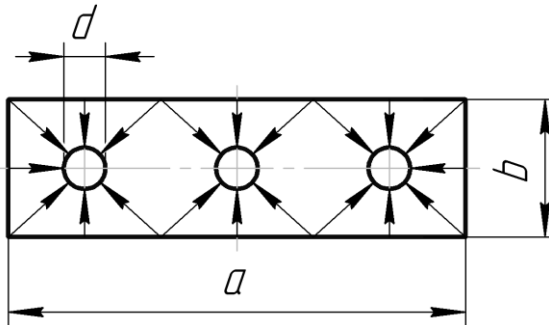


Рис. 3 – Технологічна схема формоутворення з прокачуванням робочої рідини крізь отвори в заготовці

Таку технологічну схему можливо використовувати, наприклад, для отворів з великим співвідношенням довжини отвору до його ширини, зокрема для отримання щілин.

Проте, при ширині щілини  $b=3$  мм і менше необхідно в ЕІ свердлити отвори діаметром  $d=1,5$  мм і менше. Малий діаметр отвору для відведення робочої рідини та евакуації продуктів ерозії призведе до погіршення гідродинаміки течії робочої рідини внаслідок значних гідродинамічних втрат при протіканні рідини крізь отвори малого діаметру. За таких умов динамічний тиск потоку робочої рідини знизиться, що погіршить енергетичні характеристики дуги в зоні обробки, як наслідок процес ерозії металу буде припинено. Більш того, динамічний тиск потоку робочої рідини знизиться нижче деякого критичного рівня на будь-якій ділянці МЕЗ, процес дестабілізується та може зовсім припинитися. Це суттєво обмежує область використання вископродуктивного процесу РОД.

В цьому зв'язку, нами запропоновано технологічну схему формоутворення деталей з розвиненим периметром (рис. 4), яка відрізняється тим, що в заготовці попередньо передбачають технологічний отвір діаметром 1...3 мм, який розташовують в геометричному центрі отвору заготовки, а торцеву робочу поверхню ЕІ формують

у вигляді зовнішньої конічної поверхні, основа якої являє собою периметр ЕІ, а вершину розташовують в точці, що відповідає геометричному центрі зазначеного технологічного отвору обробку виконують при прокачуванні робочої рідини через технологічний отвір в напрямку від периферії до центра ЕІ і надалі через технологічний отвір на злив.[4].

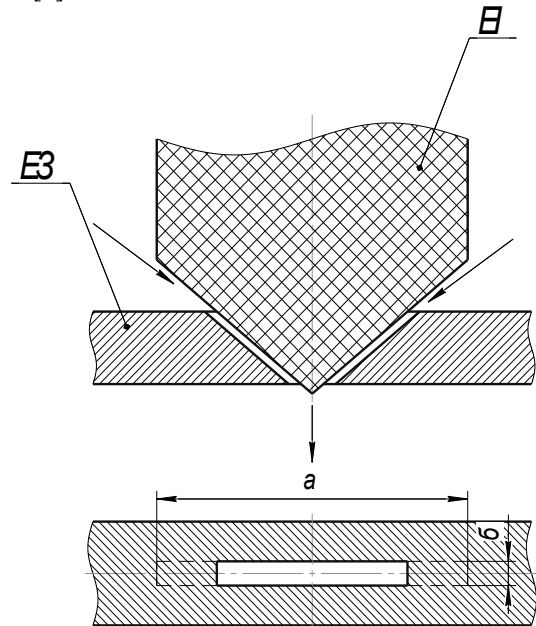


Рис. 4 – Технологічна схема формоутворення вузьких щілин

Для визначення раціональної області застосування наведених технологічних схем формоутворення в залежності від складності контуру отворів, доцільно ввести поняття критерію складності отворів як технологічного фактора в умовах РОД

**Постановка завдання** – визначення критерію складності отворів як технологічного фактора в умовах РОД.

Поставлена задача реалізується шляхом:

- визначення критерію складності;
- обґрунтування нових технологічних прийомів;
- підвищення економічної ефективності процесу.

**Виклад основного матеріалу.** Для процесу РОД складність отвору визначається можливістю організації прокачування робочої рідини через міжелектродний зазор і отже залежить від форми та розмірів оброблюваного контуру такого отвору.

Для оцінки складності виготовлення отвору за умов процесу РОД введемо поняття критерію складності  $K$ , для визначення якого запропоновано використовувати наступну залежність:

$$K = \frac{P_k}{P_\phi} K = \frac{P_k}{P_\phi}, \quad (1)$$

де  $P_k$  – периметр «ідеальної» фігури – кола, площа якого дорівнює площі отвору складного контуру, що обробляється;

$P_\phi$  – периметр отвору складного контуру.

Вибір ідеальної фігури у вигляді кола пояснюється тим, що при заданій площі отвору, саме отвір круглого поперечного перерізу отримує мінімально можливий периметр і найкращі можливості рівномірної течії робочої рідини.

Так, наприклад, до отворів складного контуру можна віднести щілини. Щілина – складна форма отвору, як в розумінні організації потоку робочої рідини, так і у співвідношенні з ідеальною фігурою – колом. За результатами експериментальних досліджень при отриманні щілин за технологічною схемою (рис. 1) мінімально можливі розміри щілин та їх співвідношення дорівнює  $a/b = 25/3$ . Складає відповідно, довжина  $a = 25$  мм, ширина  $b = 3$  мм.

Згідно виразу (1) для щілини критерій складності визначатиметься за формулою:

$$K = \frac{\pi \cdot 1,13 \cdot \sqrt{a \cdot b}}{2 \cdot (a + b)} \quad (2)$$

Для щілини зазначених розмірів при  $a = 25$  мм,  $b = 3$  мм критерій складності згідно виразу (2) складає  $K = 0,5$ .

За результатами експериментальних досліджень побудовано діаграму (рис. 5) для вибору технологічних схем формоутворення. При складності контуру отвору  $K \leq 0,5$  необхідно реалізувати технологічну схему формоутворення з суцільним електродом без отвору при прокачуванні робочої рідини через отвір в заготовці (рис. 4).

При складності отвору  $K > 0,5$  необхідно застосовувати технологічну схему формоутворення (рис. 1).

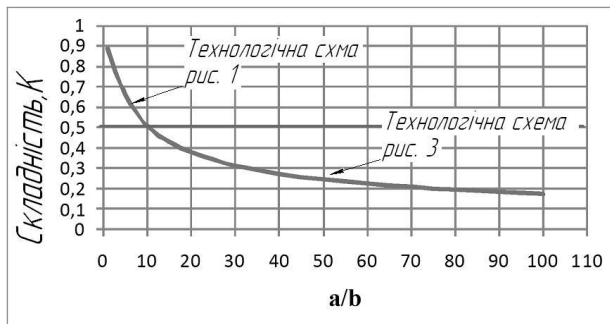


Рис. 5 – Графік залежності складності від габаритних розмірів отвору

Як приклад, розглянемо вибір технологічної схеми формоутворення для “Н” – подібного отвору з розмірами, зазначеними на рис. 5

Критерій складності такого отвору згідно виразу (2) складає  $K = 0,3$ . Тоді згідно рис. 6 потрібно реалізувати технологічну схему формоутворення з ЕІ без отвору при прокачуванні робочої рідини через отвір в заготовці (рис. 4).

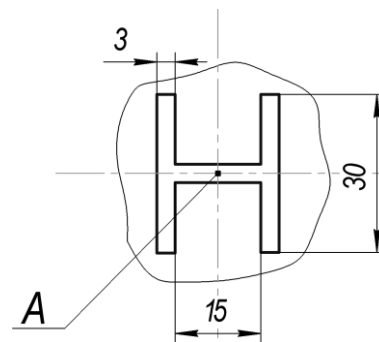


Рис. 6 – “Н” – подібний отвір

За цих умов робочу поверхню ЕІ формують у вигляді зовнішньої конічної поверхні, основа якої являє собою периметр ЕІ, а вершину розташовують в точці, що відповідає геометричному центру зазначеного технологічного отвору А (рис. 6). Такий ЕІ отримує вигляд (рис. 7).



Рис. 7 – ЕІ для отримання “Н” – подібного отвору

На рис. 8 показано ступінь впливу на продуктивність обробки  $M$  деталей з “Н” – подібним отвором змінних факторів: сили технологічного струму  $I = 50 \dots 300$  А, статичного тиску  $P_S = 0,8 \dots 1,6$  МПа, робочої напруги  $U = 28 \dots 32$  В.

Рівняння регресії для продуктивності обробки  $M$  має вигляд:

$$y(M) = 0,18 + 0,989x_1 + 0,023x_2 - 0,099x_3 \quad (3)$$

Карта Парето стандартизованих ефектів; Перемен.:  $\log M$   
3 факторний отсев. план; Остаточн. SS = ,0004525  
ЗП:  $\log M$ : =  $\text{Log}10("M \text{ mm}^3/\text{minute}')$

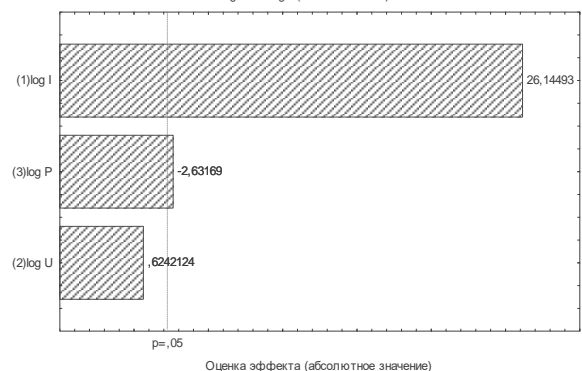


Рис. 8 – Вплив змінних факторів на продуктивність обробки  $M$

Відповідно, математична модель продуктивності процесу  $M$ , мм<sup>3</sup>/хв:

$$M = 1,51 I^{1,3} U^{0,16} P_s^{-0,22} \quad (4)$$

Отримана залежність дозволяє зробити висновок, що продуктивність обробки  $M$  в діапазоні зазначених режимів визначається переважно силою технологічного струму  $I$  (при збільшенні сили технологічного струму  $I$  продуктивність обробки  $M$  зростає) і менше – статичним тиском робочої рідини  $P_s$  (продуктивність обробки  $M$  зменшується при збільшенні  $P_s$ ). Робоча напруга  $U$  в зазначеному діапазоні, згідно рис. 9 не має істотного впливу на продуктивність процесу  $M$ , в зв'язку з цим уточнена математична модель продуктивності процесу  $M$  має вигляд, мм<sup>3</sup>/хв:

$$M = 2,818 I^{1,28} P_s^{-0,244} \quad (5)$$

На рис. 9 показано залежність продуктивності процесу  $M$  від сили технологічного струму  $I$  та статичного тиску робочої рідини  $P_s$ .

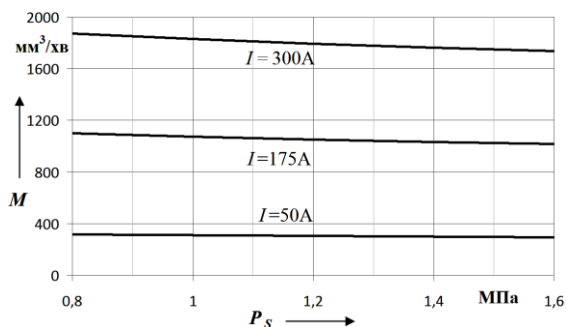


Рис. 9 – Залежність продуктивності процесу  $M$  від сили технологічного струму  $I$  та статичного тиску робочої рідини  $P_s$

На рис. 10 показано ступінь впливу основних технологічних характеристик процесу на шорсткість обробленої поверхні  $Ra$  деталей з “Н”- подібним отвором.

Рівняння регресії для шорсткості обробленої поверхні  $Ra$  має вигляд:

$$y(Ra) = 0,93 + 0,41x_1 - 0,0295x_2 - 0,41x_3 \quad (6)$$

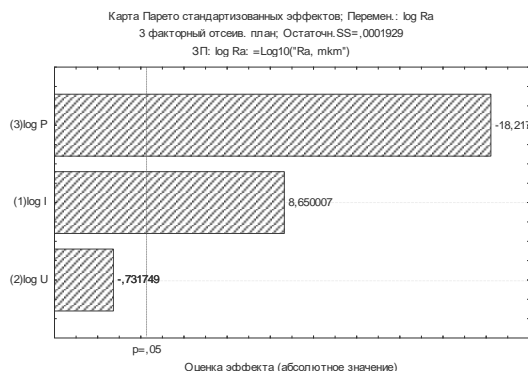


Рис. 10 – Вплив змінних факторів на величину шорсткості обробленої поверхні  $Ra$

Відповідно, математична модель шорсткості, мкм:

$$Ra = 8,51 I^{0,41} U^{-0,029} P_s^{-0,896} \quad (7)$$

Шорсткість обробленої поверхні  $Ra$  залежить переважно від статичного тиску робочої рідини  $P_s$  на вході в зазор (зменшується при збільшенні  $P_s$ ) і менше від величини сили технологічного струму ( $Ra$  збільшується при збільшенні  $I$ ). Робоча напруга  $U$ , в зазначеному діапазоні, згідно рис. 10 не має істотного впливу на шорсткість обробленої поверхні  $Ra$ , в зв'язку з цим уточнена математична модель продуктивності процесу має вигляд, мкм:

$$Ra = 1,67 I^{0,28} P_s^{-1,01} \quad (8)$$

На рис. 11 показано залежність шорсткості обробленої поверхні  $Ra$  від сили технологічного струму  $I$  та статичного тиску робочої рідини  $P_s$ .

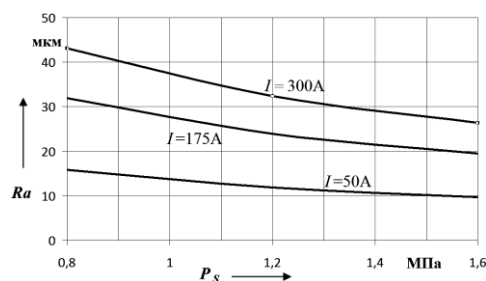


Рис. 11 – Залежність шорсткості обробленої поверхні  $Ra$  від сили технологічного струму  $I$  та статичного тиску робочої рідини  $P_s$

Ефективність і економічність процесу РОД значною мірою визначають вартість і стійкість ЕІ. Відносний лінійний знос ЕІ, виготовлених із графітового матеріалу МПГ-7 при обробці “Н”- подібного отвору в деталях не перевищує 1 %.

На рис. 12 показано ступінь впливу основних технологічних характеристик процесу на відносний лінійний знос ЕІ.

Рівняння регресії для відносного лінійного зносу ЕІ має вигляд:

$$y(\gamma) = -2,386 + 0,84x_1 - 0,07x_2 - 0,41x_3 \quad (9)$$

Карта Парето стандартизованих ефектів; Перемен.: log гама, %  
3 факторний отсев. план; Остаточн. SS=,0018206  
ЗП: log гама, % = Log10(“гама, %”)

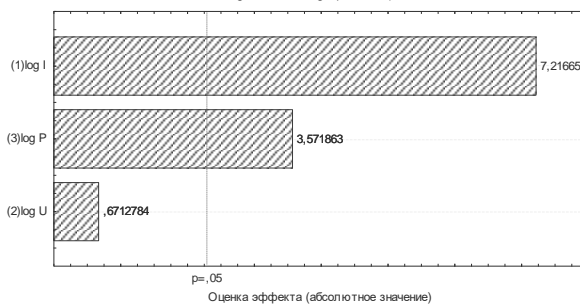


Рис. 12 – Вплив змінних факторів на відносний лінійний знос ЕІ

Відповідно, математична модель відносного лінійного зносу ЕІ має вигляд, %:

$$\gamma = 0,013 I^{0,84} U^{0,07} P_s^{0,41} \quad (10)$$

Відносний лінійний знос ЕІ  $\gamma$  залежить переважно від величини сили технологічного струму  $I$  ( $\gamma$  збільшується при збільшенні  $I$ ) і менше від статичного тиску робочої рідини  $P_s$  на вході в зазор ( $\gamma$  збільшується при збільшенні  $P_s$ ). Робоча напруга  $U$ , в зазначеному діапазоні, згідно рис. 11 не має істотного впливу на відносний лінійний знос ЕІ  $\gamma$ , в зв'язку з цим математична уточнена модель відносного лінійного зносу ЕІ  $\square$  має вигляд, %:

$$\gamma = 0,013 I^{0,0711} P_s^{0,61} \quad (11)$$

На рис. 13 показано залежність відносного лінійного зносу ЕІ  $\square$  від сили технологічного струму  $I$  та статичного тиску робочої рідини  $P_s$ .

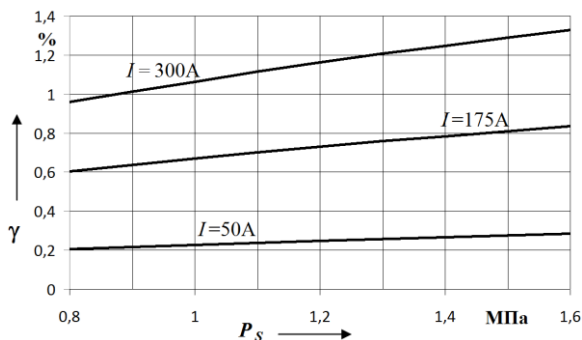


Рис. 13 – Залежність відносного лінійного зносу ЕІ від сили технологічного струму  $I$  та статичного тиску робочої рідини  $P_s$

При побудові профілю робочої поверхні ЕІ враховують технологічну схему формоутворення та міжелектродний зазор  $\delta$ . Розрахунок розмірів ЕІ з врахуванням міжелектродного зазору виконують згідно існуючих методик ЕЕО [5].

На рис. 14 показано ступінь впливу основних технологічних характеристик процесу на величину міжелектродного зазору  $\delta$ .

Рівняння регресії для величини міжелектродного зазору  $\delta$  має вигляд:

$$y(\delta) = -3,58 + 0,82x_1 + 0,0009x_2 - 0,54x_3 \quad (12)$$



Рис. 14 – Вплив змінних факторів на величину міжелектродного зазору  $\delta$

Відповідно, математична модель величини міжелектродного зазору  $\delta$  має вигляд, мм:

$$\delta = 2,63 I^{0,82} U^{0,0009} P_s^{-0,54} \quad (13)$$

Величина міжелектродного зазору  $\delta$  залежить переважно від величини сили технологічного струму  $I$  ( $\delta$  збільшується при збільшенні  $I$ ) і менше від статичного тиску робочої рідини  $P_s$  на вході в зазор ( $\delta$  зменшується при збільшенні  $P_s$ ). Робоча напруга  $U$ , в зазначеному діапазоні, згідно рис. 13 не має істотного впливу на міжелектродний зазор  $\delta$ , в зв'язку з цим уточнена математична модель величини міжелектродного зазору  $\delta$  має вигляд, мм:

$$\delta = 0,0034 I^{0,28} P_s^{-1,54} \quad (13)$$

На рис. 15 показано залежність величини міжелектродного зазору  $\delta$  від сили технологічного струму  $I$  та статичного тиску робочої рідини  $P_s$ .

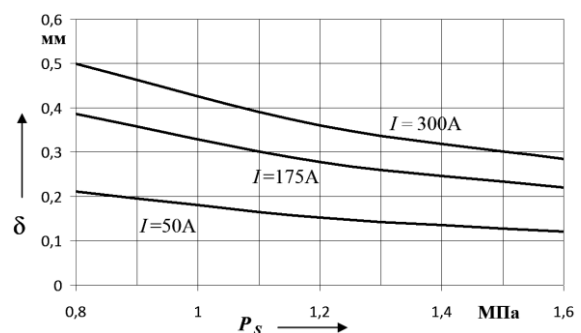


Рис. 15 – Залежність міжелектродного зазору  $\delta$  від сили технологічного струму  $I$  та статичного тиску робочої рідини  $P_s$

Згідно викладеного, динамічний тиск потоку робочої рідини в умовах РОД є основним параметром процесу, який визначає, в кінцевому підсумку, можливість та якісну сторону процесу обробки.

Отже, запропонована технологічна схема формоутворення (рис. 4) та конструкція ЕІ (рис. 7) для виготовлення “Н” – подібного отвору



забезпечують рівномірну течію робочої рідини по периметру отвора, а отже стабілізацію процесу обробки (рис. 16) та забезпечують високу продуктивність та необхідну якість обробленої поверхні.

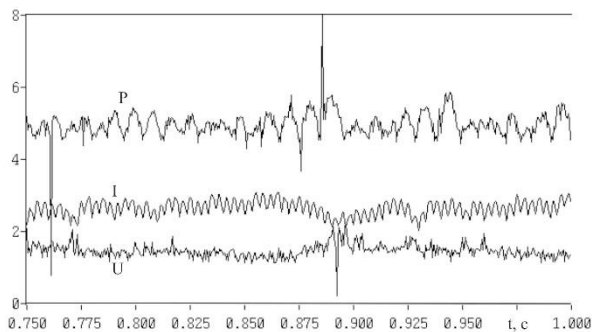


Рис. 16 – Осцилограма стабільного процесу РОД при виготовленні "Н" – подібного отвору

**Висновки.** За умов розробки технологічного процесу виготовлення отворів, для забезпечення необхідної продуктивності та якості обробки, необхідно враховувати форму та розміри отвору. Для цього введено поняття критерію складності отворів  $K$  як технологічного фактора в умовах РОД, що в відомих межах визначає область раціонального застосування однієї з наведених технологічних схем формоутворення.

За цих умов при одержанні  $K \leq 0,5$  реалізують технологічну схему формоутворення по принципу прошивання за умов використання суцільного ЕІ без отвору при прокачуванні робочої рідини через отвір в заготовці (рис. 3), а при  $K > 0,5$  реалізують технологічну схему формоутворення по принципу прошивання за умов використання ЕІ з отвором при

прокачуванні робочої рідини в напрямку від периферії ЕІ до його центру і надалі через отвір в ЕІ на злив. (рис. 1).

#### Список літератури:

1. Носуленко В.І. Розмірна обробка металів електричною дугою: автореф. дис. д-ра техн. наук: 05.03.07 «Процеси фізико-технічної обробки» / В. І. Носуленко. – Кіровоград., 1999. – 32 с.
2. Чумаченко О. С. Розмірна обробка електричною дугою листових деталей: автореф. дис. на здобуття наук, ступеня канд. техн. наук: спец. 05.03.07 «Процеси фізико-технічної обробки» / О. С. Чумаченко. – Київ, 2002. – 20 с.
3. Носуленко В. І. Розмірна обробка електричною дугою складних за зовнішнім контуром деталей / В. І. Носуленко, В. В. Юр'єв // Збірник наукових праць «КНТУ». – 2015. – № 45. – С. 109–114.
4. Носуленко В. І. Розмірна обробка електричною дугою отворів складного контуру / В. І. Носуленко, В. В. Юр'єв // Збірник наукових праць «КНТУ». – 2015. – № 28. – С. 70–73.
5. Фотеев Н. К. Технология электроэрозионной обработки / Н. К. Фотеев – М.: Машиностроение, 1980. – 184с.

#### References (transliterated):

1. Nosulenko V.I. Rozmirna obrobka metaliv elektry`chnoyu dugoyu: avtoref. dy`s. d-ra tehn. nauk: 05.03.07 «Procesy` fizy`ko-texnichnoyi obrobky`» / V. I. Nosulenko. – Kirovograd., 1999. – 32 p.
2. Chumachenko O. S. Rozmirna obrobka elektry`chnoyu dugoyu ly`stovyx detalей: avtoref. dy`s. na zdobuttya nauk, stupenya kand. tehn. nauk: specz. 05.03.07 «Procesy` fizy`ko-texnichnoyi obrobky`» / O. S. Chumachenko. – Ky`yiv, 2002. – 20 p.
3. Nosulenko V. I. Rozmirna obrobka elektry`chnoyu dugoyu skladny`x za zovnishnim konturom detalей / V. I. Nosulenko, V. V. Yur'yev // Zbirny`k naukovy`x prac` «KNTU». – 2015. – No 45. – P. 109–114.
4. Nosulenko V. I. Rozmirna obrobka elektry`chnoyu dugoyu otvori`v skladnogo konturu / V. I. Nosulenko V. V. Yur'yev // Zbirny`k naukovy`x prac` «KNTU». – 2015. – No 28. – P. 70–73.
5. Foteev N. K. Technology`ya elektroerozy`onnoy obrabotky [EDM Technology] – Moscow: Mashynostroeny`e Publ., 1980. – 184 p.

Надійшла (received) 11.11.2016

#### Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

**Критерій складності отворів як технологічний фактор в умовах РОД / В. І. Носуленко, В. М. Шмельов, В. В. Юр'єв** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – № 30(1202). – С. 56–62. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2519-2671

**Критерий сложности отверстий как технологический фактор в условиях РОД / В. И. Носуленко, В. М. Шмелев, В. В. Юрьев** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – № 30(1202). – С. 56–62. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2519-2671

**The level of difficulty of holes as a technological factor in ADM. / V. I. Nosulenko, V. M. Shmelev, V. V. Yuriev** // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy. – Kharkiv: NTU «KhPI» – 2016. – No 30 (1202). – P. 56–62. – Bibliogr.: 5 – ISSN 2519-2671.

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Носуленко Віктор Іванович** – доктор технічних наук, професор, Кіровоградський національний технічний університет, завідувач кафедри обробки металів тиском та спецтехнологій; тел.: (067) 520-46-48; e-mail: nosulenko@kntu.kr.ua.

**Nosulenko Victor Ivanovich** – doctor of engineering Sciences, Professor, Kirovograd national technical University, head of Department of processing of metals pressure and special technologies; tel: (067) 520-46-48; e-mail: nosulenko@kntu.kr.ua.

**Шмельов Віталій Миколайович** – кандидат технічних наук, доцент, Кіровоградський національний технічний університет, доцент кафедри обробки металів тиском та спецтехнологій; тел.: (066) 412-90-60; e-mail: 1shvm@mail.ru.

**Shmelyov Vitaliy Nikolaevich** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Kirovograd National Technical University, Associate Professor at the Department of processing of metals pressure and special technologies; tel.: (066) 412-90-60; e-mail: 1shvm@mail.ru.

**Юр'єв Віталій Віталійович** – Кіровоградський національний технічний університет, аспірант; тел.: (050) 041-07-72; e-mail: vitaliy-gs@ukr.net

**Yuriev Vitaly Vitalyevich**– Kirovograd National Technical University, graduate student; tel.: (050) 041-07-72; e-mail: vitaliy-gs@ukr.net

УДК 621.7.004

Р. Г. ПУЗЫРЬ, Р. Г. АРГАТ

**ИЗМЕРЕНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ РАДИАЛЬНО-РОТАЦИОННОГО ПРОФИЛИРОВАНИЯ ОБОДЬЕВ КОЛЕС МЕТОДОМ ТЕНЗОМЕТРИРОВАНИЯ**

Вимірювання деформацій і обчислення за ним поля напружень в обробці металів тиском методом тензометрування є добре зарекомендованим способом збору інформації про напружено-деформований стан. Проте в дослідженнях процесу радіально-ротаційного профілювання ободів коліс цей метод не отримав належного поширення через переміщення осередку деформації і відсутності вільних зон заготовки. У даній роботі наводяться результати тензометрування при моделюванні даного процесу. Деформації вимірюються в пружній зоні в статичному режимі, що дає можливість судити про їх розмір і спрямованість безпосередньо в осередку пластичної деформації. Наведено порівняльні дані експериментальних та теоретичних досліджень.

**Ключові слова:** обід, обечайка, деформація, тензорезистор, напруження, профілювання.

Измерение деформаций и вычисление по ним поля напряжений в обработке металлов давлением методом тензометрирования является хорошо зарекомендованным способом сбора информации о напряженно-деформированном состоянии. Однако в исследованиях процесса радиально-ротационного профилирования ободьев колес этот метод не получил должного распространения из-за перемещения очага деформации и отсутствия свободных зон заготовки. В данной работе приводятся результаты тензометрирования при моделировании данного процесса. Деформации измеряются в упругой зоне в статическом режиме, что дает возможность судить об их величине и направленности непосредственно в очаге пластической деформации. Приведены сравнительные данные экспериментальных и теоретических исследований.

**Ключевые слова:** обод, обечайка, деформация, тензорезистор, напряжения, профилирование.

Dimension of strain and calculation on them of the stress field in the metal forming strain measurement method is a well-established way to gather information on the stress-strain state. However, studies of the process of radial rotation profile rims this method has not received proper distribution due to the movement of the deformation zone and the lack of available areas of the workpiece. In this paper, the results of strain measurement in the simulation of this process. Deformation is measured in the elastic zone in the static mode, which gives the opportunity to judge their size and orientation directly in the hearth of plastic deformation. Comparative data experimental and theoretical studies. The coincidence of the results is a proposal of 10%. It is shown that the magnitude of the meridional stretching deformation depends on the shape of workpiece and number of transition profiling

**Keywords:** rim, shell, deformation, lode cell, strain, profiling.

**Ведение.** При исследовании технологических процессов обработки металлов давлением, и в частности процессов вытяжки-формовки, электротензометрия получила наибольшее распространение [1]. В настоящее время доступна длинная линейка тензорезисторов различного исполнения и широким диапазоном параметров. К достоинствам тензометрии следует отнести возможность обработки данных в реальном времени, передачи на большие расстояния на устройство обработки, высокая чувствительность и разрешающая способность, низкая инерционность, высокая стабильность параметров и др. К недостаткам тензометрирования относится необходимость тарировки датчиков, а также зависимость сигнала с датчика от температуры и качества монтажа [2].

**Анализ состояния вопроса.** Измерение деформаций и вычисление по ним напряжений, которые действуют в очаге деформации при радиально-ротационном профилировании обода путем установки тензорезисторов, не представляется возможным из-за вращения обечайки относительно формирующего инструмента и, как следствие, перемещения очага деформации в каждый последующий момент процесса [3, 4].

**Существующие методы решения задачи.** Деформированное состояние полуфабриката в процессе профилирования определяют методом сеток [5]. При этом удается достаточно просто рассчитать интегральные компоненты тензора

напряжений и деформаций, что позволяет судить об общей картине распределения данных характеристик процесса по каждому переходу профилирования. Однако представляет интерес изучение поля напряжений в ходе непосредственного деформирования, что метод сеток обеспечить не может.

**Цель работы.** Качественное и количественное определение напряжений и деформаций в процессе радиально-ротационного профилирования ободьев колес, сравнение полученных результатов с формальными расчетами.

**Методы исследования.** Было предложено измерять деформации, действующие в очаге деформации косвенно в статическом режиме. Т. е. деформирующий инструмент останавливался в начале процесса профилирования, заготовка одевалась на внутренний ролик, а наружному предавалось движение подачи навстречу внутреннему. Таким образом, моделировался процесс профилирования в определенный момент за малый промежуток времени, осуществлялось так называемое «мгновенное обжатие».

Измерительная станция состояла из аналого-цифрового преобразователя Е14-440, блока питания АХ-1803D, операционного усилителя КР140УД1А и компьютера ASUS X552MJ. Вся участвующая в измерениях аппаратура прошла метрологический контроль в установленный срок. Тип применяемых тензорезисторов – КФ 5П1-5-200-А-12, с базой 5 мм, сопротивлением  $R = 199,7 \pm 0,2$  Ом и

чувствительностью  $K = 2,11$ . Для наклейки резисторов использовался клей холодного отверждения циакрин ЭО.

Для регистрации сопротивлений рабочих тензорезисторов при их деформации использовали четвертьмостовую схему с одним рабочим тензопреобразователем без термокомпенсации, при этом непосредственно измеряли ток разбаланса моста.

Принимались следующие допущения:

- процесс является близким к монотонному деформированию и, следовательно, можно использовать положения деформационной теории пластичности;

- заготовка находится в условиях плоского напряженного и объемного деформированного состояния;

- материал заготовок изотропный, упругие деформации подчиняются закону Гука;

- компоненты деформации условно принимались средними и относились к центру ячейки;

- направление главных деформаций на поверхности заготовки известно, меридиональные деформации действуют вдоль образующих, тангенциальные – по окружности обечайки;

- объемная деформация значительно меньше возникающих в заготовке основных деформаций (это дает возможность использовать условие несжимаемости в упругой области  $\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 = 0$ ).



Рис. 1 – Первый переход радиально-ротационного профилирования обода колеса W8x16 (коническая заготовка)

При наклейке тензорезисторы ориентировались по направлениям главных напряжений (деформаций) (рис. 1). Для исследований выбирались по 5 моделей заготовок и полуфабрикатов после первого, второго и третьего переходов профилирования ободьев колес W8x16, 5,5Fх20, ДW20x26 и 9,00x22,5. Показания тензорезисторов для каждого типоразмера обода колеса усреднялись, при этом проводилась статистическая обработка полученных данных, согласно методики ДСТУ 8.207–76.

В ходе проводимых экспериментов необходимо было установить:

- 1) качественную картину распределения компонент тензора деформаций на боковой поверхности заготовок и полуфабрикатов;

- 2) количественную оценку, возникающим во время нагружения деформациям по периферии заготовки и сравнить полученные результаты с расчетными зависимостями;

- 3) влияние формы заготовки первого перехода профилирования на величину и характер распределения меридиональных и тангенциальных деформаций вне участка приложения нагрузки;

Плоское напряженное состояние на поверхности детали характеризуется тремя составляющими тензора напряжений  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  и  $\tau_{xy}$ . Подсчитывались эти составляющие по трем измеренным компонентам тензора деформаций  $\epsilon_x$ ,  $\epsilon_y$  и  $\gamma_{xy}$  при известных постоянных материала: модуле упругости первого рода  $E$  и модуле упругости второго рода  $G$  (для стали 08 кп  $E=203$  ГПа;  $G=83$  ГПа [6]), а так как деформации принимались главными, то главные нормальные и максимальное касательное напряжение в точке находили по следующим зависимостям [6]:

$$\sigma_1 = \frac{E}{1-\mu^2} (\epsilon_1 + \mu\epsilon_2), \sigma_2 = \frac{E}{1-\mu^2} (\epsilon_2 + \mu\epsilon_1),$$

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}.$$

Деформацию сдвига  $\gamma_{xy}$  напрямую измерить нельзя, так как тензорезисторы реагируют лишь на линейные деформации  $\epsilon_x$ ,  $\epsilon_y$  и не чувствительны к деформациям сдвига [2] и в задачи исследований данные измерения не входили.

**Результаты исследования.** Типовые графики изменения напряжения АЦП от прилагаемой нагрузки приведены на рис. 2–5. после первичной математической обработки в прикладном пакете MathCad.

Как видно из представленных на рис. 2 графиков при наложении давления наружным роликом на цилиндрическую заготовку периферийная ее часть испытывает деформации. Графики имеют ступенчатый вид, где четко просматриваются участки приложения нагрузки и выдержки. Наиболее ярко выделяется показание 4 резистора, который расположен под углом  $180^\circ$  от места приложения давления. Он наклеен в тангенциальном направлении

в зоне формирования посадочной полки и испытывает деформации сжатия, что подтверждает факт изменения формы обечайки в процессе локального приложения нагрузки. Меридиональные деформации в данном месте фиксируются показаниями 6 резистора, который наклеен в зоне формирования центрального ручья. Во время приложения усилия на графике видна ступенька вниз, затем плавный подъем, что свидетельствует о возникновении сжимающих меридиональных деформаций во время нагружения и восстановлении формы в меридиальном направлении за интервал выдержки под нагрузкой. На участке, расположенном под углом 90° от зоны приложения давления просматривается деформация сжатия в меридиальном направлении, которая регистрируется двумя датчиками – 1 и 5. Причем датчик 1, который расположен в зоне формирования полки деформируется на порядок больше датчика 5, который наклеен на участке формовки центрального ручья. Количественная оценка деформаций проводилась на основе тарировочных кривых.

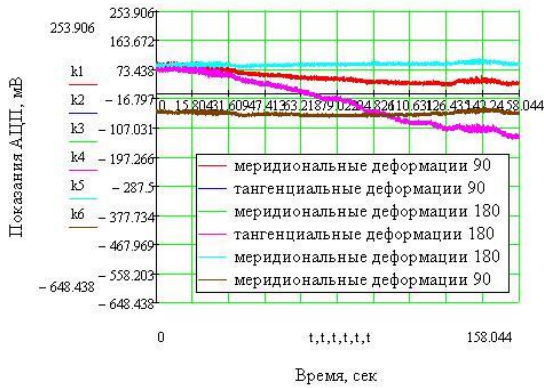


Рис. 2 – Профилирование цилиндрической заготовки (первый переход)

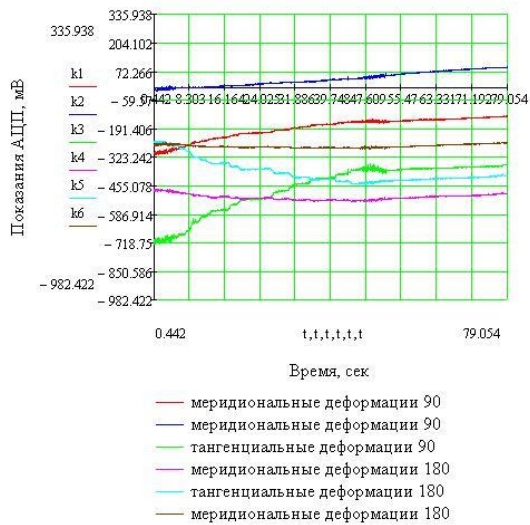


Рис. 3 – Профилирование конической заготовки (первый переход)

Анализируя представленные на рис. 3 данные, можно заключить, что коническая заготовка во время локального деформирования испытывает изменение формы начальной окружности, что вызывает возникновение знакопеременных деформаций. В зоне, расположенной под углом 90° относительно действующего нагружения возникают меридиональные и тангенциальные растягивающие деформации (резистор 1 расположен на участке формирования посадочных полок в меридиальном направлении, резистор 2 – в зоне центрального ручья; резистор 3 – на участке центрального ручья в тангенциальном направлении). Более интенсивно увеличиваются тангенциальные растягивающие деформации, что свидетельствует о их большей величине непосредственно в очаге пластической деформации. Если сравнивать меридиональные деформации, то видно, что на участке полок они имеют большую величину, чем в зоне центрального ручья. На участке, расположенном под углом 180° к нагрузке наблюдается обратная картина распределения деформаций. Здесь возникают сжимающие меридиональные и тангенциальные деформации (резисторы 4, 6 расположены в меридиальном направлении на участке формирования полок с двух противоположных сторон; резистор 5 – в тангенциальном направлении на отрезке формирования центрального ручья), однако интенсивность их роста заметно меньше, чем на участке, который находится ближе к действующей нагрузке.

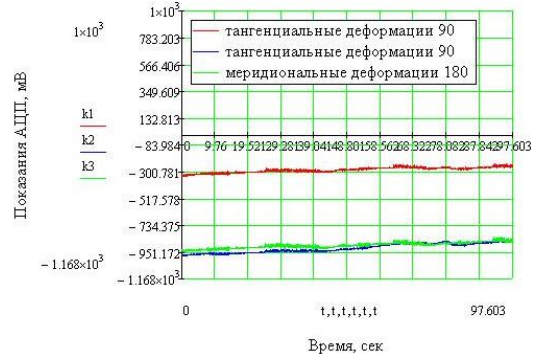


Рис. 4 – Второй переход профилирования

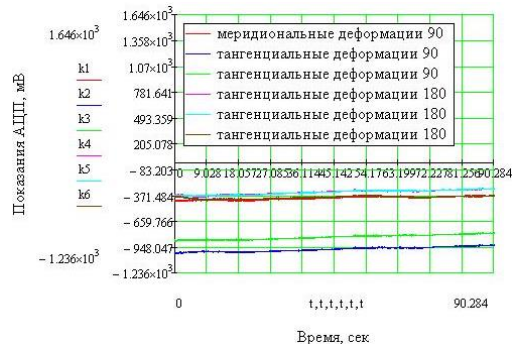


Рис. 5 – Третий переход профилирования

На графиках второго перехода наблюдается аналогичная картина распределения деформаций. На участке, который находится под углом 90° к действию нагрузки возникают растягивающие меридиональные

и тангенциальные деформации (датчики 2, 3 наклеены в тангенциальном направлении, датчик 1 – в меридиональном; располагаются в зоне центрального ручья), на противоположном участке возникают сжимающие тангенциальные деформации, как в зоне полки, так и в зоне центрального ручья. Однако, визуально можно оценить, что величина действующих деформаций намного меньше, чем в первом переходе профилирования. Это подтверждает факт увеличения жесткости полуфабриката второго перехода, так как после деформации на первом переходе он приобретает характерный профиль.

При нагружении полуфабриката на третьем переходе фиксируется небольшой рост растягивающих тангенциальных деформаций в зоне  $90^\circ$  как участка посадочной полки (резистор 2), так и участка центрального ручья (резистор 1). Однако, по сравнению с первым и вторым переходом меридиональные деформации, действующие в зоне  $180^\circ$  (резистор 3) становятся растягивающими и увеличиваются по ходу проведения опыта. Это может свидетельствовать о том, что более жесткий профиль третьего перехода не претерпевает изменения формы и не получает сжимающих тангенциальных деформаций в зоне противоположной нагрузки.

Как видно из приведенных графиков первого перехода цилиндрической и конической заготовок, их периферийная часть в процессе деформирования испытывает различные по направлению и величине напряжения. Так участок, расположенный под углом  $90^\circ$  для цилиндрической заготовки получает растягивающие меридиональные напряжения, как в зоне ручья, так и в зоне посадочной полки, что достаточно хорошо коррелирует с расчетными вычислениями – разница составила 13%. Наоборот, та часть цилиндрической заготовки, которая находится под углом  $180^\circ$  к поверхностной нагрузке, подвергается действию сжимающих тангенциальных напряжений, в то время как расчетные значения показывают действие здесь растягивающих, хотя по модулю их значения различаются на 15% [7–9].

Для конической заготовки под углом в  $90^\circ$  к нагрузке возникают растягивающие тангенциальные и меридиональные напряжения, которые совпадают по направлению для двух методик исследования. Их разница по величине составила: для меридиональных напряжений – 25% (участок ручья), 26% (участок полки); для тангенциальных напряжений – 4% (участок полки). В зоне  $180^\circ$  относительно действующего давления в эксперименте фиксировались тангенциальные и меридиональные напряжения сжатия, что подтверждают также расчетные данные. Различие в количественном отношении между полученными данными: для меридиональных напряжений – 9,1% (зона полки); для тангенциальных напряжений – 13% (зона ручья). Следовательно, на первом переходе профилирования

напряженно-деформированное состояние заготовки зависит от формы полуфабриката и зоны расположения датчиков или угла отсчета для формальных вычислений. Опытные значения меридиональных напряжений отличаются от расчетных в некоторых случаях знаком, то есть их направлением действия. Данное явление объясняется принятым допущением о том, что нагрузка распределена по поверхности заготовки симметрично и направление действия напряжений изменяется в зависимости от угла обхода окружности заготовки также симметрично, относительно места приложения усилия по закону косинуса. Также в математических моделях и соответственно в решениях не учитывается переходная зона, которая присутствует при локальном формовании профиля и оказывает влияние на распределение компонент тензора напряжений на его периферийных участках. В этом случае всегда имеет место неравномерная по ширине заготовки тангенциальная деформация металла [11].

На последующих переходах профилирования для всех типоразмеров ободьев колес величина экспериментальных значений напряжений достаточно хорошо совпадает с расчетными данными, отклонения не превышают 15%. Но как показано выше, значения напряжений на участке, расположенном под углом  $180^\circ$  отличаются знаком. Это явление не вносит критических корректив при определении компонент тензора напряжений в очаге деформации, но при проектировании ресурсосберегающих технологических процессов радиально-ротационного профилирования необходимо обращать особое внимание на деформацию боковой поверхности заготовки и тем самым, определять зоны силового догружения.

**Выводы.** Качественная оценка распределения компонент тензора деформаций при радиально-ротационном профилировании, которая рассматривалась выше, характерна для всех исследуемых профилей: W8x16, 5,5Fx20, DW20x26 и 9,00x22,5. Не зависимо от схемы профилирования боковая поверхность заготовки, свободная от действия инструмента, получает знакопеременные тангенциальные и меридиональные деформации. Их величина и направление будет зависеть от номера перехода, схемы нагружения и участка свободной поверхности обечайки.

#### Список литературы

1. Пригоровский Н.И. Методы и средства определения полей деформаций и напряжений: Справочник / Н.И. Пригоровский. – М.: Машиностроение, 1983. – 248 с.
2. Шушкевич В.А. Основы электротензометрии / В.А. Шушкевич. – Минск: Высшейшая школа, 1975. – 352 с.
3. Чигиринский В.В. Современное производство колес автотранспортных средств и сельскохозяйственной техники: [Монография] / В.В. Чигиринский, В.Л. Мазур, С.Б. Беликов, [и др.]. – Днепропетровск: РИА «Днепр-VAL», 2010. – 309 с.



4. Потекушин Н.В. Усилие при радиальном профилировании обечаек на первых переходах / Н.В. Потекушин, Г.Е. Березюк, В.Ф. Троян, А.Г. Слепынин // Автомобильная промышленность. – 1977. – №5. – С. 24–29.

5. Puzyr R. Determining experimentally the stress-strained state in the radial rotary method of obtaining wheels rims / R. Puzyr, T. Haikova, O. Trotsko, R. Argat // Astern-european journal of enterprise technologies. Industrial and technology systems. – 2016. – VOL. 4. – NO 1(82). – P. 52–60.

6. Хан Х. Теория упругости : Основы линейной теории и ее применения : Пер. с нем. / Х. Хан. – М. : Мир, 1988. – 344 с.

7. Пузырь Р.Г. Установление поля напряжений при радиально-ротационном профилировании цилиндрической заготовки без учета радиусов закругления деформирующего инструмента / Р.Г. Пузырь, Е.Н. Сосенушкин, Е.А. Яновская // Вестник МГТУ «Станкин». Научный рецензируемый журнал. М. : МГТУ «Станкин», 2013. – №4 (27). – С. 42–47.

8. Пузырь Р.Г. Распределение напряжений на коническом участке профиля полуфабриката первого перехода радиально-ротационного профилирования / Р.Г. Пузырь, О.Н. Долгих, Б.С. Гриценко, Л.Э. Дикая // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчук : КрНУ, 2015. – Випуск 3(92), часть 1. – С. 67–73.

9. Пузырь Р.Г. Расчет компонент тензора напряжений на втором переходе радиально-ротационного профилирования ободьев колес транспортных средств / Р.Г. Пузырь // Сборник научных трудов «Обработка материалов давлением». – Краматорск : ДГМА, 2016. – №1 (42). – С. 164–168

10. Тришевский И.С. Теоретические основы процесса профилирования / И.С. Тришевский, М.Е. Докторов. М. : Металлургия, 1980. – 288 с.

#### References (transliterated)

1. Prigorovskij N.I. *Metody i sredstva opredelenija polej deformacij i naprjazhenij: Spravochnik* [Methods and means of determining the fields of deformations and stresses: Reference book]. Moscow, Mashinostroenie, 1983. 248 p.

2. Shushkevich V.A. *Osnovy jelektrotenzometrii* [Fundamentals of electrocentrale]. Minsk, Vyshejschaja shkola, 1975. 352 p.

3. Chigirinskij V.V., Mazur V.L., Belikov S.B., Kolesnik F.I., Legotcin G.I., Slepynin A.G., Shevchenko T.G. *Sovremennoe proizvodstvo koles avtotransportnyh sredstv i sel'skhozajstvennoj*

tehniki : [Monografija] [Modern production of wheels of motor vehicles and agricultural machinery]. Dnepropetrovsk, RIA «Dnepr-VAL», 2010. 309 p.

4. Potekushin N.V., Berezjuk G.E., Trojan V.F., Slepynin A.G. Usilie pri radial'nom profilirovanii obechaek na pervyh perehodah [Force in the radial profiling of the shells at first transitions]. *Avtomobil'naja promyshlennost'*. 1977, №5, pp. 24–29.

5. Puzyr R., Haikova T., Trotsko O., Argat R. Determining experimentally the stress-strained state in the radial rotary method of obtaining wheels rims. *Astern-european journal of enterprise technologies. Industrial and technology systems*. 2016, VOL. 4, No 1(82), pp. 52–60.

6. Han H. *Teorija uprugosti : Osnovy linejnoj teorii i ee primenenija : Per. s nem.* [Theory of elasticity : Foundations of linear theory and its applications]. Moscow, Mir, 1988, 344 p.

7. Puzyr' R.G., Sosenushkin E.N., Janovskaja E.A. Ustanovlenie polja naprjazhenij pri radial'no-rotacionnom profilirovanii cilindricheskoj zagotovki bez ucheta radiusov zakruglenija deformirujushhego instrumenta [The establishment of a stress field with radial-profiling of a rotating cylindrical workpiece without taking into account the radii of curvature of the deforming tool]. *Vestnik MGTU «Stankin»*. *Nauchnyj recenziruemyj zhurnal*. Moscow, MGTU «Stankin», 2013, №4 (27), pp. 42–47.

8. Puzyr' R.G., Dolgih O.N., Gricenko B.S., Dikaja L.Je. Raspredelenie naprjazhenij na konicheskom uchastke profilja polufabrikata pervogo perehoda radial'no-rotacionnogo profilirovanija [The stress distribution on the conical portion of the profile prefabricated transition on first radial rotary profiling]. *Visnik Kremenčuc'kogo nacional'nogo universitetu imeni Mihajla Ostrograds'kogo*. Kremenčuk, KrNU, 2015, Vipusk 3(92), chast' 1, pp. 67–73.

9. Puzyr' R.G. Raschet komponent tenzora naprjazhenij na vtorom perehode radial'no-rotacionnogo profilirovanija obod'ev koles transportnyh sredstv [The calculation of the component stress tensor at the second transition radial rotation profile rims wheels of vehicles] *Sbornik nauchnyh trudov «Obrabotka materialov davleniem»*. Kramatorsk, DGMA, 2016, №1 (42), pp. 164–168.

10. Trishevskij I.S., Doktorov M.E. *Teoreticheskie osnovy processa profilirovanija* [The theoretical basis of the profiling process]. Moscow, Metallurgija, 1980. 288 p.

Поступила (received) 08.11.2016

#### Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

**Вимірювання деформацій при моделюванні радіально-ротаційного профілювання ободів коліс методом тензометрування / Р. Г. Пузырь, Р. Г. Аргат // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – № 30(1202). – С. 63–68. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2519-2671**

**Измерение деформаций при моделировании радиально-ротационного профилирования ободьев колес методом тензометрирования / Р. Г. Пузырь, Р. Г. Аргат // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – № 30(1202). – С. 63–68. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2519-2671**

**Dimension of deformations in the modeling radial rotation profile rim strain measurement method / R. G. Puzyr, R. G. Argat // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy. – Kharkiv: NTU «KhPI» – 2016. – No 30 (1202). – P. 63–68. – Bibliogr.: 5 – ISSN 2519-2671**

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Пузир Руслан Григорович** – кандидат технічних наук, доцент, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, доцент кафедри технології машинобудування; тел.: (067) 601-67-47; e-mail: puzyruslan@gmail.com.

**Пузырь Руслан Григорьевич** – кандидат технических наук, доцент, Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского, доцент кафедры технологии машиностроения; тел.: (067) 601-67-47; e-mail: puzyruslan@gmail.com.

**Puzyr Ruslan Grigorjevich** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Associate Professor at the Department of Mechanical Engineering; tel.: (067) 601-67-47; e-mail: puzyruslan@gmail.com.

**Аргат Роман Григорович** – старший викладач, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, доцент кафедри технології машинобудування; тел.: (067) 530-55-73; e-mail: argat@ua.fm.

**Аргат Роман Григорьевич** – старший преподаватель, Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского, доцент кафедры технологии машиностроения; тел.: (067) 530-55-73; e-mail: argat@ua.fm.

**Argat Roman Grigorjevich** – Senior Lecturer, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Associate Professor at the Department of Mechanical Engineering; tel.: (067) 530-55-73; e-mail: argat@ua.fm.

УДК 621.98.044: 629.7 +620.17 +620. 22-4

**М. Е. ТАРАНЕНКО****ИНТЕРАКТИВНЫЙ КОНТРОЛЬ ШТАМПОВКИ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ЛИСТОВЫХ ДЕТАЛЕЙ**

Обговорены преимущества интерактивного контроля процесса штамповки крупногабаритных листовых деталей. Контролируются формы заготовки в ходе процесса деформирования, величина зазоров между отштамповкой и оснасткой и, в определенной мере, состояние энерговыделяющей системы оборудования.

Рассмотрено два метода контроля: с помощью струйных воздушных датчиков и акустический метод контроля. Приведены возможные варианты технических решений расположения датчиков. Методы контроля применимы для штамповки на многокривошипных механических прессах, процессов штамповки эластичной или жидкой средой, а также импульсных (электрогидравлических) методов штамповки указанных деталей. Показаны преимущества и недостатки двух методов.

**Ключевые слова:** листовая штамповка, контроль, струйные датчики, акустический метод контроля, штамповая оснастка.

Обговорені переваги інтерактивного контролю процесу штампування великогабаритних листових деталей. Контролюються форми заготовки в ході процесу деформування, величина зазорів між отштамповки і оснащенням і, до певної міри, стан енерговиделяючої системи обладнання.

Розглянуто два методи контролю: за допомогою струменевих повітряних датчиків і акустичний метод контролю. Наведено можливі варіанти технічних рішень розташування датчиків. Методи контролю застосовні для штампування на многокривошипних механічних пресах, процесів штампування еластичною або рідким середовищем, а також імпульсних (електрогидравлічних) методів штампування зазначених деталей. Показано переваги та недоліки двох методів.

**Ключові слова:** листова штамповка, контроль, струменеві датчики, акустичний метод контролю, штампова оснастка.

A large sheet metal parts are parts with dimensions greater than 1.0 m. In most cases, on the surface they are local elements in the form of a rift, cuttings, parts of mating surfaces with small radii of curvature. These sites require for their formation of high pressure or effort compared to the shaping of the general shape of the part. These details are avtokuzovnye panels, mirrors or antennas satellite space communications, details of cladding and lining units aircraft. To assess the ability to control the value of the blank to fit different matrix structure were analyzed and methods for measuring the characteristic distances – potentiometric, capacitive, inductive sensors and optical measurement methods. Main advantages of interactive control of forming of large-dimensional sheet articles are considered. Principal parameters under controlling of forming are blank shape, value of gapping between blank and forming tool and the state of energy-releasing system of equipment. Two controlling methods are analyzed: by means of jet-pipe transducers and acoustic method. Possible methods of engineering solutions of transducers location are shown. Mentioned methods of controlling are applicable for forming of large-dimensional articles on crank mechanical presses, by elastic or liquid mediums and impulse (electro-hydraulic) ones. Advantages and disadvantages of considered controlling methods are revealed.

**.Keywords:** sheet forming, controlling, jet-pipe transducer, acoustic method of controlling, forming tool.

**Введение.** К крупногабаритным листовым деталям относятся детали с габаритными размерами более 1,0 м. В большинстве случаев на своей поверхности они имеют локальные элементы в виде рифтов, подсечек, участков сопряжения поверхностей с малыми радиусами кривизны. Эти участки требуют для своего формообразования повышенного давления или усилий по сравнению с формообразованием генеральной формы детали. К таким деталям относятся автокузовные панели, зеркала антенн спутниковой или космической связи, детали обшивки и облицовки агрегатов самолетов. Они изготавливаются:

– на механических многокровошипных прессах с использованием штамповой оснастки, состоящей из матрицы и пуансона или нескольких пуансонов. Эти процессы характерны для массового или крупносерийного производства деталей. Для более мелких серий деталей они экономически не выгодны;

– на прессах штамповки эластичной средой или жидкостью типа прессов «Quintus». В таких процессах используется один элемент оснастки – матрица или формблок (пуансон). При этом необходимы высокие давления для деформирования, действующие на большой площади. Что, в свою очередь, обуславливает большую металлоемкость оборудования и высокие энергозатраты. Процессы

используются в серийном и мелкосерийном производствах;

– на импульсных прессах, в частности, электрогидравлических с управляемым полем нагружения и последовательным локальным деформированием заготовки. Такие процессы используются в индивидуальном и мелкосерийном производствах.

**Основная часть.** Необходимость интерактивного контроля процесса штамповки крупногабаритных деталей, т. е. контроля процесса или состояния заготовки в ходе самого процесса, обусловлено рядом факторов.

1. Высокими требованиями к качеству деталей, точностью их размеров и формы. Для некоторых типов деталей такой группы допустимое отклонение формы от формы оснастки не превышает 0,3...0,5 мм.

2. Большой трудоемкостью контроля размеров и формы нежестких деталей. В условиях штамповки таких деталей практически единственным носителем заданных параметров является штамповая оснастка. Т. е. контроль можно осуществлять за счет определения отклонений поверхностей детали от поверхности оснастки.

3. Наличием большого коробления (поводок) отштампованных деталей, возникающих от действия

остаточних напружень. Для некоторых перспективных для применения сортов и марок сталей степень коробления достигает значений, соизмеримых с размерами деталей.

4. Неточностью дозирования прилагаемого усилия или давления, которая определяется широкими значениями допусков на механические свойства штампуемого материала. Для некоторых марок стали допуски на пределы прочности и текучести достигают 20 % от номинального значения. А номинальные значения сильно зависят от направления проката. В свою очередь неточность дозирования приводит к недоштамповке или увеличению наклепа поверхности детали.

Все вышеперечисленное можно устранить и получать качественные детали при правильном построении технологического процесса на основе знания состояния деформируемой заготовки в ходе самого процесса штамповки и степени прилегания заготовки к формозадающей поверхности оснастки. Строгим дозированием выделяемой энергии, которая может трансформироваться в прилагаемое к заготовке давление или скорость ее приближения к матрице, можно исключить недоштамповку, наклеп, отскок детали от матрицы и другие явления, приводящие к неточности детали.

Более просто проблема неточности детали решается в процессах последовательного локального деформирования и в процессах штамповки эластичной и жидкими средами. В этих процессах достаточно легко можно дозировать прилагаемую энергию и давление в ходе самого процесса штамповки. При штамповке на механических многокривошипных прессах контролю поддается степень прилегания поверхности заготовки к матрице и развиваемое прессом усилие при калибровочных переходах.

**Цель работы** – исследовать возможность применения методов контроля положения заготовки в оснастке и диагностики работы оборудования, в отличие от известных методов контроля, не требующих существенного усложнения оснастки, сложного контрольного и диагностического оборудования, а, в оптимальном случае, бесконтактного контроля.

Для оценки возможности контроля величины прилегания заготовки к матрице были проанализированы разные конструкции и методы измерения характерных расстояний – потенциметрические, емкостные, индуктивные датчики и оптические методы измерений. В условиях штамповки они обладают определенными преимуществами, но главный их недостаток сводится к необходимому присутствию в рабочей зоне электрических проводки и контактов. Контакты подвергаются загрязнению и, как следствие, ненадежно работают. Электрическая проводка часто повреждается большими перемещаемыми массами металла.

В таких условиях наиболее приемлемыми можно считать являются воздушные струйные датчики расстояний [1-3]. Прежде всего, в них привлекает: простота – датчик состоит практически из одной детали – сопла; высокая точность измерения расстояний 0–10 мм, невысокие питающие давления сжатого воздуха, устойчивость к вибрациям, электрическим помехам, загрязнениям. За базовую поверхность принимается поверхность матрицы, что позволяет не применять дополнительные контрольно-измерительные устройства.

Современное исполнение подобных элементов представлено в [5–8].

Некоторые варианты использования и установки струйных датчиков показаны на рис. 1 и 2. Для регистрации равномерности по периметру вытяжки фланца днщ датчики 4 рекомендуется устанавливать в прижимной плите 2, ориентируя в радиальном направлении. В исходном положении фланец заготовки 6 перекрывает отверстия для выхода воздуха и его расход через датчик минимальный. По мере вытяжки фланца в полость матрицы увеличивается расход воздуха через датчик, что снижает давление в питающей сети  $P_{пит}$  (Па), которое регистрируется микроманометром (на рис. 1 показан условно). Такое изменение по величине сигнала прямопропорционально величине перемещения фланца. При сравнении этих сигналов с нескольких датчиков легко определить расположение участков более интенсивной вытяжки фланцев и, после несложных пересчетов, положение данной части заготовки.

При неравномерной прогрессирующей вытяжке фланца процесс останавливается на промежуточном этапе, заготовка проворачивается на  $90^\circ \dots 180^\circ$  и процесс деформирования продолжается далее. Такая последовательность действий предотвращает появление брака из-за неравномерности сил трения или большой анизотропии свойств металла заготовки.

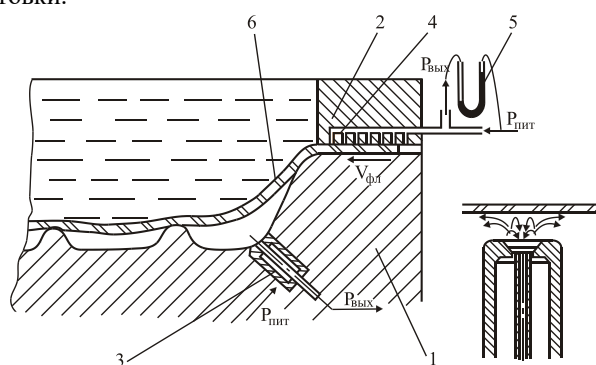


Рис. 1 – Вариант расположения воздушных струйных датчиков для контроля параметров штамповки:  
1 – матрица; 2 – прижимная плита; 3 – датчик для определения расстояния заготовки до матрицы;  
4 – датчик для контроля вытяжки фланца;  
5 – микроманометр; 6 – заготовка

Во втором случае для определения положения заготовки относительно матрицы 1, на участках, в которых заготовка прилегает к матрице в последнюю очередь, рекомендуется использовать дифференциальный (двухканальный) датчик 3. По наружному каналу подается питающий поток воздуха, на выходе из сопла воздушные струи отражаются от поверхности заготовки. Давление в центральной зоне датчика повышается и по изменению этого давления можно судить о расстоянии от заготовки до торца датчика. Зависимость выходного сигнала преобразователя пропорциональна третьей степени расстояния между поверхностями заготовки и матрицы. Это позволяет с достаточной точностью определять зазоры.

Вариант расположения струйных датчиков при штамповке высокоточных зеркал антенн космической связи показан на рис. 2.

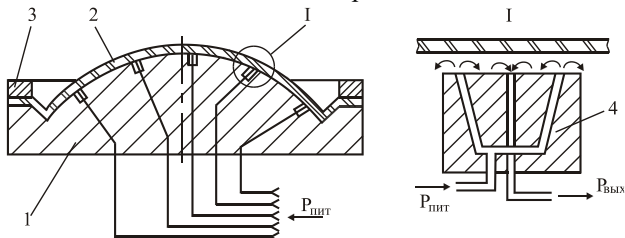


Рис. 2 – Вариант расположения струйных датчиков для определения прилегания заготовки к матрице:

- 1 – матрица; 2 – заготовка; 3 – прижимное кольцо;
- 4 – корпус датчика;  $P_{пит}$  – питающее давление;
- $P_{вых}$  – измеряемый параметр

Установка воздушных струйных датчиков в штамповой оснастке не сложна и инструментальное обеспечение замеров довольно просто. Подача воздуха в зазоры между матрицей и отштампованной деталью упрощает съем последней из полости матрицы, позволяет отказаться от различного рода выталкивателей, что упрощает штамповую оснастку.

Описанный метод конкретного положения заготовки позволяет получать результаты с высокой точностью без снятия детали с оснастки. А это упрощает процесс контроля. Но вместе с тем, требует определенного усложнения оснастки и наличия регистрирующей аппаратуры (главным образом трубопроводы) не упрощает архитектуру технологической зоны. Гальванический контакт между оснасткой и измерительной аппаратурой при использовании ЭГ-прессов или магнито-импульсных установок может приводить к появлению электрических шаговых напряжений на приборах. Исходя из этого желательно использовать для контроля бесконтактные методы измерений.

При использовании последовательной локальной штамповки крупногабаритных листовых деталей на ЭГ-прессах [4] для определения степени доштамповки заготовки и диагностики работы оборудования предлагается использовать акустический метод. Его суть состоит в регистрации и соответствующей обработке акустических

сигналов, излучаемых листовой заготовкой при импульсном нагружении, ее взаимодействии с матрицей при взаимном ударе, а также импульсных сигналов элементов оборудования. Сама заготовка, как мембрана, корпуса разрядных камер, оснастки, а также кожухи разрядника и прочих элементов конструкции пресса, выделяют звуковые сигналы при импульсном нагружении, пропорциональные количеству выделенной при взрыве энергии на частоте, определяемой их жесткостью. В Национальном аэрокосмическом университете им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт» были проведены эксперименты, основной задачей которых было установление корреляционных зависимостей акустических показателей от степени деформации заготовки и состояния системы выделения энергии электрогидравлического пресса. Схема экспериментов показана на рис. 3.

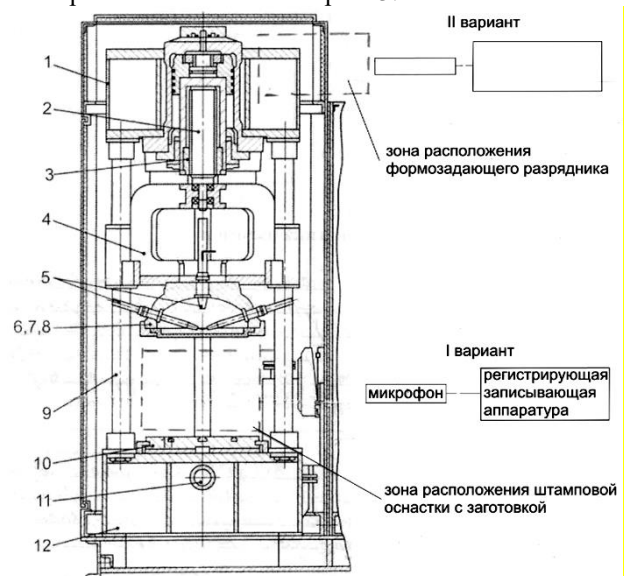


Рис. 3 – Схема конструкции ЭГ-пресса и схема расположения микрофонов (два варианта) для записи звуковых сигналов: I вариант – запись звуковых сигналов от заготовки и общей выделенной энергии;

- II вариант – запись звуковых сигналов подаваемой в рабочую зону энергии; 1 – верхняя траверса, совмещенная с расходной емкостью для воды; 2 – прижимной гидроцилиндр; 3 – механизм регулирования хода подвижной траверсы; 4 – подвижная траверса рамного типа; 5 – боковой и верхний рабочие электроды; 6 – разрядная камера; 7 – эластичная диафрагма; 8 – прижимное кольцо диафрагмы; 9 – колонна; 10 – выдвигной стол; 11 – гидроцилиндр выдвигания стола; 12 – нижняя траверса

К числу бесконтактных методов исследований относятся акустические методы. Они широко используются в промышленности, при диагностике зданий и сооружений (мостов, крупных химических колонн и пр.) при этом исследуемый объект сначала нагружается коротким акустически или механическим сигналом определенной частоты, а регистрируется акустическая реакция объекта на возмущающий импульс.

В непосредственной близости от исследуемого объекта, например, разрядной камеры с прижатой к ней заготовкой и матрицей (вариант I) устанавливается микрофон шумомера, соединенной с самим шумомером и электронным осциллографом для визуальной записи сигнала. На прессе производились ЭГ-разряды и акустические сигналы от них регистрировались.

В качестве регистрируемых параметров были выбраны уровень звукового давления  $L_H$  (дБ) и частота звукового сигнала. В качестве регистрирующей аппаратуры использовался прецизионный импульсный шумомер 00017 (RFT, ГДР) и электронный запоминающий осциллограф С8-13. Эксперименты проводились на стандартном ЭГ-прессе ПЭГ-25. Микрофоны шумомера устанавливались на уровне расположения заготовки (~ 1,2 м от пола) на расстоянии 0,8 м от защитной шторы прессы, выполненной из оргстекла. Регистрировались уровни звукового давления на частотах от 63,5 Гц до 8000 Гц, а также усредненное по октавам значение  $L_H$ . Одновременно записывались осциллограммы разрядных тока и напряжения, а также импульсного давления в куполе разрядной камеры. Плоская круглая заготовка штамповалась последовательными разрядами энергией 13,5 кДж. Изменением межэлектродного расстояния имитировалось нарушение системы выделения энергии. В результате экспериментов установлены следующие зависимости (рис. 4).

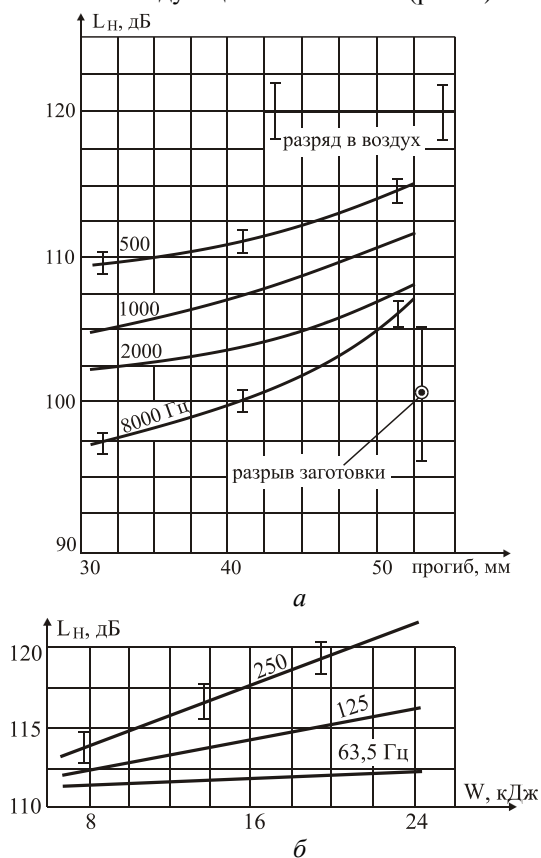


Рис. 4 – Зависимость уровня звукового давления: а – от прогиба заготовки; б – от запасаемой энергии при штамповке днищ из материала сталь 08кп, лист 1,0 мм

С увеличением выделяемой энергии увеличивается уровень звукового давления (рис. 4, б). Эта зависимость становится более крутой с увеличением частоты октав с 63,5 Гц до 250 Гц. Доверительный интервал зависимостей при 95 % надежности находится в пределах 2-5 % регистрируемого значения (на графике вертикальные черточки).

Установлена зависимость уровня звукового давления от прогиба заготовки (ее жесткости). На рис. 4, а показано, что, в общем, с увеличением прогиба увеличивается значение регистрируемого параметра, генерируемого при ЭГ-разряде. Эта зависимость на частотах 63,5 и 125 Гц достаточно слабая, а на более высоких частотах выражена сильнее. На графике показаны точки, соответствующие разрыву заготовки ( $L_H \approx 101 \pm 4,5$  дБ) и разряду в пустую матрицу (имитируется калибровка отштамповки) –  $120 \pm 2$  дБ. Последние два значения – это линеаризованные по октавам значения  $L_H$ .

Полученные зависимости вполне объяснимы следующим образом. На начальном этапе деформирования, при более податливой заготовке выделявшаяся энергия в большей мере тратится на пластическое формоизменение заготовки, и ее меньшая часть отражается от заготовки и вызывает колебания технологической обстановки. По мере увеличения прогиба увеличивается жесткость заготовки и соотношение поглощенной и отраженной долей энергии меняется в пользу последней. Следовательно, с увеличением прогиба увеличивается генерируемый заготовкой уровень звукового давления. При разрыве заготовки ее жесткость резко уменьшается, что приводит к падению значения  $L_H$ . При калибровке заготовки большая часть выделившейся энергии переходит в акустическую форму.

Более резко зависимость  $L_H$  от прогиба на частотах 2000-8000 Гц объясняется более высокой частотой колебаний изогнутой заготовки по сравнению с более плоской. Чем ближе частота, пропускаемая измерительным каналом к собственной частоте заготовки, тем более резкая зависимость уровня звукового давления от прогиба, наблюдающегося в экспериментах.

Деформирование заготовки под действием ЭГ-разряда происходит с колебаниями сложной формы. Наблюдаются колебания с двумя и более гармониками [4], соответствующими разным формам колебаний. Расчет колебаний деформируемой заготовки в рамках теории С. П. Тимошенко для условий эксперимента дает два значения собственной частоты: основная 50–100 Гц и более высокая 1-2 кГц. Характерные частоты, наблюдаемые в условиях эксперимента 1,0...2,0 кГц; 100 Гц и 20–22 Гц. Как видно, расчетные и опытные значения частот довольно близки. Наблюдаемые на осциллограммах гармоники более низкой частоты



могут относиться к колебаниям конструкции прессы или оснастки.

**Выводы.** Предложены два метода интерактивного контроля процессов листовой штамповки, отличающейся оценки формы и размеров получаемых деталей, сложностью организации технологической зоны и наличием или отсутствием механического контакта между технологической оснасткой и измерительной или регистрирующей аппаратурой.

Другие методы интерактивного контроля штамповки крупногабаритных деталей исследованы в меньшей степени.

#### Список литературы

1. Залманзон, Л. А. Теория элементов пневмоники [текст]/ Л. А. Залманзон. – М. : Физматгиз, 1969, 568 с.
2. Дылев, В. И. Применение струйных датчиков в комплексах оборудования с промышленными роботами [текст]: / В. И. Дылев. А. С. Шаров. – Минск, Вестник машиностроения, № 6, 1978. – С. 18–20.
3. Баселаев, В. Н. Исследование струйных датчиков расстояния [текст] / В. Н. Баселаев, В. К. Даниленко и М. П. Чайко // В сб. «Вопросы струйной техники». – Минск, 1975, – С. 164–177.
4. Тараненко, М. Е. Электрогидравлическая штамповка: теория, оборудование, техпроцессы [текст]: монография в 2 ч. [текст] / М. Е. Тараненко. – Харьков, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», 2011 – 272 с.
5. Горюнов В. А. Разработка метода повышения эффективности струйных управляющих устройств систем автоматического управления технологическим оборудованием [текст]: автореферат дис. ... кандидата технических наук : 05.13.06 / Волгогр. гос. техн. ун-т. – Волгоград, 2001. – 19 с.

6. Режим доступа: <http://lib-bkm.ru/load/23-1-0-1411>. Дата обращения: 20.09.2015 г.

7. Режим доступа: [http://en.wikipedia.org/wiki/Pneumatics\\_automation](http://en.wikipedia.org/wiki/Pneumatics_automation). Дата обращения: 21.10.2015 г.

8. Режим доступа: <http://www.numaticengineering.com/pneumatic-automation-components.html>. Дата обращения: 20.05.2016 г.

#### References (transliterated):

1. Zalmanzon L.A. Theory of pneumatic elements [text]. [Phizmatgiz, Moscow, 1969, 568 p.
2. Dylev V.I., Sharov A.S. Application of jet-pipe transducers in complexes with industrial robotic equipment. Herald of Machine-building [text]: Collection of Scientific Papers. Minsk, No.6, 1978, pp. 18 – 20.
3. Baselayev V.N., Danilenko V.K., Chaiko M.P. Studying of jet-pipe transducers of distances. Problems of jet engineering [text]: Collection of Scientific Papers. Minsk, 1975, pp. 164 – 177.
4. Taranenko M.Ye. Electro-hydraulic forming: theory, equipment, manufacturing processes [text]: monograph (in 2 parts). Zhukovsky National Aerospace University “KhAI”. Kharkiv, 2011, 272 p.
5. Gorunov V.A. Developing of the method of improving efficiency of jet control systems for automatic controlling of manufacturing facilities [text]: abstract dis. ... The candidate of technical sciences: 05.13.06 / Volgogr. state. tehn. Univ. – Volgograd, 2001. – 19 p.
6. Available at: <http://lib-bkm.ru/load/23-1-0-1411>. (accessed 20.09.2015 г.)
7. Available at: [http://en.wikipedia.org/wiki/Pneumatics\\_automation](http://en.wikipedia.org/wiki/Pneumatics_automation). (accessed 21.10.2015 г.)
8. Available at: <http://www.numaticengineering.com/pneumatic-automation-components.html>. (accessed 20.05.2016 г.)

*Надійшла (received) 15.11.2016*

#### Бібліографічні описи / Библиографическое описание / Bibliography dicriptions

**Интерактивный контроль штамповки крупногабаритных листовых деталей / М. Е. Тараненко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – № 30(1202). – С. 69–73. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2519-2671**

**Интерактивный контроль штампування великогабаритних листових деталей / М. Є. Тараненко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – № 30(1202). – С. 69–73. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2519-2671**

**Interactive controlling of forming of large-dimensional sheet articles / М. Е. Тараненко // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy. – Kharkiv: NTU «KhPI» – 2016. – No 30 (1202). – P. 69–73. – Bibliogr.: 8 – ISSN 2519-2671**

#### Відомості про автора / Сведения об авторе / About the Author

**Тараненко Михаил Евгеньевич** – доктор технических наук, профессор, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», г. Харьков, тел.: (057) 788-41-70, e-mail: k107@khai.edu.

**Тараненко Михайло Євгенович** – доктор технічних наук, професор, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», м. Харків, тел.: (057) 788-41-70, e-mail: k107@khai.edu.

**Mykhaylo Taranenko** – Full Professor, National Aerospace University “Kharkiv aviation institute” named after N. Ye. Zhukovsky, Kharkiv, tel.: (057) 788-41-70, e-mail: k107@khai.edu.

УДК 621.771.63

**О. И. ТРИШЕВСКИЙ, А. Г. КРЮК, С. Ю. ПЛЕСНЕЦОВ**

### **ИССЛЕДОВАНИЕ УТОНЕНИЯ В МЕСТАХ ИЗГИБА И ИЗМЕНЕНИЕ ШИРИНЫ ИСХОДНОЙ ЗАГОТОВКИ**

Установлено, что утонение, возникающее в местах изгиба тонкостенных гнутых профилей, увеличивает расчётную ширину заготовки и в ряде случаев, особенно при формовке тонкостенных профилей с элементами двойной толщины сложной конфигурации может приводить к искажению их формы. Проведены теоретические исследования величины утонения в местах изгиба гнутых профилей, получена формула для определения приращения ширины в каждом месте изгиба, которой следует пользоваться при проектировании технологии и выборе ширины заготовки при освоении новых профилей.

**Ключевые слова:** гнутый профиль, место изгиба, утонение металла, приращение ширины заготовки, крутящий момент, радиальная составляющая скорости.

Встановлено, що стоншування, що виникає в місцях вигину тонкостінних гнутих профілів, збільшує розрахункову ширину заготовки і у ряді випадків, особливо при формуванні тонкостінних профілів з елементами подвійної товщини складної конфігурації може приводити до спотворення їх форми. Проведені теоретичні дослідження величини стоншування в місцях вигину гнутих профілів, отримана формула для визначення приросту ширини в кожному місці вигину, якою слід користуватися при проектуванні технології і виборі ширини заготовки при освоєнні нових профілів.

**Ключові слова:** гнутий профіль, місце вигину, стоншування металу, приріст ширини заготовки, момент, що крутить, радіальна складова швидкості.

When the forming rolls in roll forming mill in the field of bending metal necking occurs, causing a change in bandwidth during its deformation. Therefore, if we ignore this increase in width of the workpiece, during the development of the production of new profiles situation arises technology, when its width is larger than the estimated width of the roll caliber varying mill, which in some cases can lead to the formation of profile defects flatness its individual elements. The perspective gage of profiles of a difficult configuration with elements of double thickness is analyzed. It is set that the weight of 1 running meter of bent profiles, and, therefore, their thickness, permanently decrease. Now, in a gage there are profiles 0.5 mm thick and less. It causes a row of the additional difficulties connected to receiving qualitative thin-walled profiles, in particular, owing to change of thickness of a preformed band from thin-sheet material, origin of nonplanarity on separate sections of profiles is possible. It is set that thinning of sheet metall, arising up in the places of bend of the thin-walled bent types, increases the calculation width of purveyance and in a number of cases, especially at roll forming of the thin-walled types with the elements of double thickness of the complicated configuration can result in distortion of their form. Theoretical researches of size of thinning in the places of bend of the bent types are conducted, a formula is got for determination of increase of width in every place of bend, which it is necessary to use at planning of technology and choice of width of purveyance at mastering of new types.

**Keywords:** bent type, place of bend, thinning of metal, increase of width of purveyance, twisting a moment, radial constituent of speed.

**Вступление.** В работе [1] приведен анализ современного состояния сортамента гнутых профилей с элементами двойной толщины, в котором отмечается, что ввиду с его постоянного совершенствования и развития, что связано с необходимостью повышать экономические показатели и эффективность применения гнутых профилей в различных металлоконструкциях, вес 1 погонного метра гнутых профилей, а, следовательно, их толщина, постоянно снижаются. В настоящее время, в сорimente есть профили толщиной 0,5 мм и меньше. А это, в свою очередь, вызывает ряд дополнительных трудностей, связанных с получением качественных тонкостенных профилей. В связи с изложенным работы, направленные на анализ возможных причин появления бракованной продукции, их учёт и дальнейшее совершенствование технологии получения экономически эффективной металлопродукции, являются важными и актуальными.

**Анализ состояния вопроса, основных достижений и литературы.** При формоизменении в валках профилегибочного стана в местах изгиба происходит утонение металла, вызывающее изменение ширины полосы в процессе ее деформации. В связи с этим, если не учитывать это увеличение ширины заготовки, при освоении

технологии производства новых профилей возникает ситуация, когда её ширина оказывается больше расчётной ширины калибра валков в той или иной клетки, что в ряде случаев может привести к образованию дефектов профиля по неплоскостности его отдельных элементов. Особенно часто возникновение такого дефекта возможно при освоении профилей сложной формы, в том числе с элементами двойной толщины из тонкостенного материала [1].

В работах [2–5] приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований процессов формообразования таких профилей, однако, задача определения конечной зависимости приращения ширины заготовки в процессе формовки там не ставилась и не решалась.

В связи с изложенным, **целью данной работы** является проведение теоретических исследований формообразования участка изгиба на профилях, результаты которых позволили бы получить инженерную зависимость приращения ширины заготовки на участках изгиба, которую можно использовать при проектировании калибровок валков для освоения новых тонкостенных профилей с элементами двойной толщины.

**Материалы исследований.** Для исследования распределения утонения по поперечному сечению полосы в процессе профилирования рассмотрим

изгиб ее нижним валком в ручье калибра верхнего валка (рис. 1).

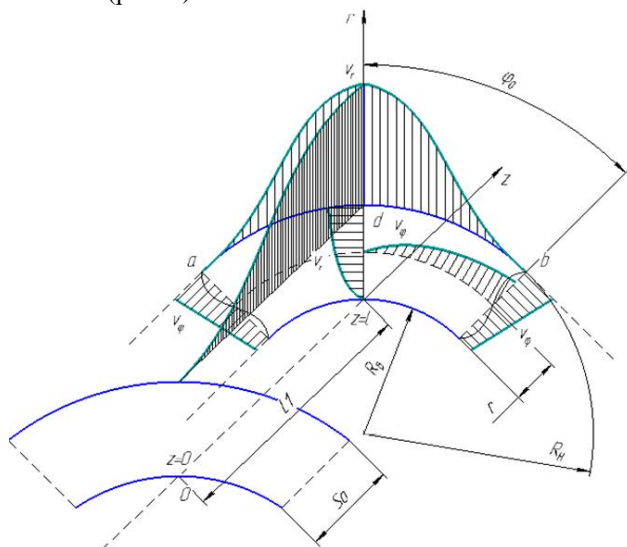


Рис.1 – Схема очага деформации при формообразовании места изгиба на гнутом профиле

При этом значение изгибающего момента для материала, обладающего упругопластическими свойствами, определим по формуле [6].

$$M = \frac{S_0^2 L_1}{4} \left[ \sigma_s \left( 1 - \frac{P}{E} \right) \left( 1 - \frac{4\sigma_s \rho^2}{3E^2 S_0^2} \right)^2 + \frac{P S_0}{3\rho} \right]. \quad (1)$$

где  $\rho = \sqrt{R_H R_B}$  – радиус нейтрального слоя напряжений;

$P$  – модуль упрочнения;

$S_0$  – исходная толщина заготовки;

$L_1$  – длина очага деформации перед формирующей клетью.

Это выражение позволяет определить радиус кривизны в любом сечении полосы, если известно распределение изгибающих моментов. При этом ширина мест изгиба в каждой последующей клетке равна ширине пластически-деформированного участка полосы в предыдущей клетке.

Сопоставляя распределение изгибающих моментов по ширине полосы с его значением на границе участка пластической деформации можем определить ширину места изгиба, на которой происходит утонение металла.

$$M = \sigma_s \frac{S_0^2 L_1}{4}, \quad (2)$$

Приняв во внимание, что распределение изгибающих моментов является функцией внешних сил в каждом сечении по ширине места изгиба, можно определить радиус кривизны из уравнения (1):

$$\frac{8\sigma_s^3 \left( 1 - \frac{P}{E} \right)}{9E^4 S_0^4} \rho^4 - \frac{8\sigma_s^2 \left( 1 - \frac{P}{E} \right)}{3E^2 S_0^2} \rho^2 + \frac{P S_0}{3} \rho - \left[ \frac{4M}{L_1 S_0^2} - \sigma_s \left( 1 - \frac{P}{E} \right) \right] = 0. \quad (3)$$

Рассматривая утонение в каждом конкретном сечении места изгиба как функцию относительного радиуса кривизны в этом же сечении, определенного по формуле (3), величину утонения находим из следующего уравнения [7]:

$$\eta^3 - 2\eta^2(2r_e + 1) + \eta(4r_e^2 + 4r_e + 1,25) - 0,25 = 0, \quad (4)$$

где  $\eta$  – относительное удлинение,

$r_e$  – относительный внутренний радиус.

Таким образом, уравнения (3) и (4) позволяют установить зависимость утонения от параметров и формы профиля, механических свойств металла полосы.

Учитывая, что при профилировании значение утонения с увеличением относительного радиуса изгиба стремится к нулю, а при его уменьшении – значительно возрастает, с достаточной степенью точности можно принять зависимость абсолютного утонения от радиуса изгиба в виде гиперболы:

$$\Delta S = \frac{A}{\rho^n}, \quad (5)$$

где  $A$  и  $n$  – постоянные.

Исследования изготовления на профилегибочных станах уголков, швеллеров и других сортовых профилей показало, что перемещение металла в местах изгиба вдоль полосы отсутствует, поэтому осевая составляющая скорости равна нулю:

$$v_z = 0. \quad (6)$$

Остальные две составляющие – радиальная  $v_r$  и тангенциальная  $v_\varphi$  – зависят от всех трех координат:

$$v_r = v_r(r, \varphi, z); \quad v_\varphi = v_\varphi(r, \varphi, z).$$

Экспериментальные исследования утонения в местах изгиба показали, что по мере прохождения полосы через валки профилегибочного стана, то есть с уменьшением внутреннего радиуса места изгиба, увеличивается степень утонения; при этом утонение по ширине места изгиба распределяется неравномерно и является функцией полярного угла  $\varphi$  в месте изгиба.

Так как скорости частиц металла тождественно равны перемещениям в единицу времени, радиальную составляющую скорости можно записать в общем виде следующим образом:

$$v_r = \left( Ar + \frac{B}{r} \right) \Phi(\varphi) \frac{z}{l}, \quad (7)$$

где  $r$  – текущий радиус-вектор точки в месте изгиба;

$A$  и  $B$  – постоянные коэффициенты;

$\Phi(\varphi)$  – функция полярного угла  $\varphi$ , учитывающая зависимость радиальной составляющей скорости  $v_r$  от этого угла;

$l$  – длина участка полосы, на которой происходит утонение при формоизменении полосы от плоской до готового профиля;

$z$  – аппликата рассматриваемого поперечного сечения полосы.

Експериментальними дослідженнями встановлено, що змінення кута підгибки полок на участку очага деформації за осевої плоскістю валков незначительно по сравнению с изменением его перед этой плоскістю. В соответствии с изменением кута підгибки изменяются и деформации в месте изгиба. Поэтому длину участка полосы  $l$ , на которой происходит утонение, принимаем как сумму длин очагов деформации перед осевої плоскістю валков по всем проходам, считая, что величина утонения распределяется по этой длине равномерно.

Для нахождения коэффициентов  $A$  и  $B$  уравнения (7) рассмотрим перемещение точек металла, лежащих на биссектрисе кута изгиба (при  $\varphi = 0$ ) в поперечном сечении полосы  $z=l$ . В этом сечении перемещение частиц металла, лежащих на биссектрисе кута изгиба, происходит только вдоль радиуса, что позволяет принять в выражении для радиальной составляющей скорости этих точек  $\Phi(\varphi) = 1$ , после чего выражение (7) можно записать в следующем виде:

$$v_r = Ar + \frac{B}{r} \quad (8)$$

Коэффициенты  $A$  и  $B$  выражения (8) можно определить из граничных условий формоизменения полосы в валках профилегибочного стана: точка касания полосы с вершиной верхнего валка, лежащая на биссектрисе кута места изгиба во внутреннем радиусе, остается неподвижной относительно остальных точек места изгиба на всем протяжении перехода полосы из плоской заготовки в готовый профиль, то есть ее радиальное перемещение равно нулю, а точка, лежащая на наружном радиусе, получает максимальное перемещение.

Таким образом, эти граничные условия имеют вид:

$$v_r = 0 \text{ при } r=R_g; \quad v_r = -v_0 \text{ при } r=R_n. \quad (9)$$

Из (7) и (9) получим систему двух уравнений с двумя неизвестными  $A$  и  $B$ :

$$AR_g + \frac{B}{R_g} = 0; \quad AR_n + \frac{B}{R_n} = -v_0. \quad (10)$$

Решаем (10):

$$A = -\frac{v_0}{R_n - \frac{R_g^2}{R_n}}; \quad B = \frac{v_0 R_g^2}{R_n - \frac{R_g^2}{R_n}}. \quad (11)$$

Подставив значения  $A$  и  $B$  (11) в (8), после некоторых преобразований получим следующее выражение для радиальной составляющей скорости:

$$v_r = -\frac{v_0}{R_n - \frac{R_g^2}{R_n}} \left( r - \frac{R_g^2}{r} \right) \Phi(\varphi) \frac{z}{l}. \quad (12)$$

В выражении (12) осталась неизвестной только функция  $\Phi(\varphi)$ . На основании экспериментальных исследований было установлено, что изменение утонения по ширине места изгиба описывается функцией следующего вида:

$$\Phi(\varphi) = \cos^4 \frac{\pi\varphi}{2\varphi_0} \quad (13)$$

Подставив (13) в (12), получим окончательное выражение для радиальной составляющей скорости:

$$v_r = -\frac{v_0}{R_n - \frac{R_g^2}{R_n}} \left( r - \frac{R_g^2}{r} \right) \frac{z}{l} \cos^4 \frac{\pi\varphi}{2\varphi_0}. \quad (14)$$

Так как течение металла вдоль полосы отсутствует, то площадь, заключенная между наружной поверхностью места изгиба в деформированном и недеформированном состояниях, будет определять приращение ширины исходной заготовки при ее формоизменении.

Эту площадь можно определить следующим образом:

$$F = \int_0^{\varphi_0} v_r R_n d\varphi \quad (15)$$

где  $v_r$  – радиальная составляющая скорости;

$R_n d\varphi$  – длина элемента дуги на наружной поверхности места изгиба.

Подставив выражение радиальной составляющей скорости из (14) при  $\eta=R_n$  в (15) и проинтегрировав, получим:

$$F = \frac{3}{4} v_0 R_n \varphi_0 \frac{z}{l}$$

Для готового профиля (то есть при  $\frac{z}{l} = 1$ ),

имеем:

$$F = \frac{3}{4} v_0 R_n \varphi_0$$

Тогда величина приращения ширины исходной заготовки

$$\Delta b = \frac{F}{S_0} = \frac{3}{4} v_0 \frac{R_n \varphi_0}{S_0} \quad (16)$$

где  $R_n$  – наружный радиус в месте изгиба, мм;

$\varphi_0 = \frac{\alpha}{2}$  – половина кута підгибки элемента профиля, принятого по калибровке, рад;

$v_0 = \Delta S_{\max}$  – величина максимального утонения в месте изгиба, мм;

Подставив в (16) значения  $\varphi_0$  и  $v_0$ , получим формулу для определения величины приращения ширины исходной заготовки:

$$\Delta b = \frac{3\Delta S_{\max}}{8S_0} R_n \alpha \quad (17)$$

**Выводы.** 1. На основании исследования процесса утонения в местах изгиба получена формула

для определения величины приращения ширины исходной заготовки.

2. Полученная зависимость позволит правильно определять ширину исходной заготовки для получения качественных гнутых профилей проката с размерами в пределах установленных допусков на готовое изделие.

#### Список литературы:

1. Тришевский О.И., Плеснецов С.Ю. Анализ современного состояния производства и применения специальных профилей с местами изгиба на 180°. // Обработка материалов давлением. Сб. науч. трудов ДГМА. – Краматорск. – 2009. – № 2 (21). – С. 227–230.
2. Тришевский О.И., Плеснецов С.Ю. Теоретический анализ формовки специальных профилей с местами изгиба на 180°. // Вісник НТУ «ХПІ». Харків. – 2009. – № 33. – С. 119–130.
3. Тришевский О.И., Плеснецов С.Ю. Разработка методики исследования специальных гнутых профилей с элементами изгиба на 180° и технологии их производства // Вісник НТУ У «КПІ» – Київ. – 2010. – № 60 – С. 212–215.
4. Плеснецов С.Ю. Исследование угонений и смещения нейтрального слоя при изгибе листового металла на 180°. // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків. – 2011. – № 47. – С. 69–75.
5. Плеснецов С.Ю., Тришевский О.И. Теоретический анализ деформированного состояния металла в местах изгиба до 180°. // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків. – 2015. – № 24 (1133). – С. 77–86.
6. Алексеев Ю. Н. Вопросы пластического течения металлов. // Харьков: Изд-во ХГУ, 1958.

7. Мoшнин Е.Н. Исследование пластического изгиба. В кн. Элементы теории и новые процессы обработки металлов давлением. // Труды ЦНИИТМАШ, кн. 62. – Москва : Машгиз, 1954.

#### References (transliterated):

1. Trishevskiy O.I., Plesnetsov S.Yu. Analiz sovremennoogo sostoyaniya proizvodstva i primeneniya spetsialnyih profiley s mestami izgiba na 180°. // Obrabotka materialov davleniem. Sb. nauch. trudov DGMA. – Kramatorsk. – 2009. – No 2 (21). – P. 227–230.
2. Trishevskiy O.I., Plesnetsov S.Yu. Teoreticheskiy analiz formovki spetsialnyih profiley s mestami izgiba na 180°. // Visnik NTU «KHPi». Kharkov. – 2009. – No 33. – P. 119–130.
3. Trishevskiy O.I., Plesnetsov S.Yu. Razrabotka metodiki issledovaniya spetsialnyih gnutyih profiley s elementami izgiba na 180° i tehnologii ih proizvodstva. // Visnik NTU U «KPI». – Kyiv. – 2010. – No 60. – P. 212–215.
4. Plesnetsov S.Yu. Issledovanie utoneniy i smescheniya neytralnogo sloya pri izgibe listovogo metalla na 180°. // Visnik NTU «HPi». – Kharkiv. – 2011. – No 47. – P. 69–75.
5. Plesnetsov S.Yu., Trishevskiy O.I. Teoreticheskiy analiz deformirovannogo sostoyaniya metalla v mestah izgiba do 180°. // Visnik NTU «HPi». – Kharkiv. – 2015. – No 24 (1133). – С. 77–86.
6. Alekseev Yu. N. Voprosy plasticheskogo techeniya metallov. // Kharkov: Izd-vo HGU, 1958.
7. Moshnin E.N. Issledovanie plasticheskogo izgiba. V kn. Elementy teorii i novyye protsessy obrabotki metallov davleniem. // Trudy TsNIITMASH, kn. 62. – Moscow : Mashgiz Publ., 1954

Поступила (received) 07.11.2015

#### Бібліографічні описи / Библиографическое описание / Bibliography dicriptions

**Исследование угонения в местах изгиба и изменение ширины исходной заготовки / О. И Тришевский, А. Г. Крюк, С.Ю. Плеснецов** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – № 30(1202). – С. 74–78. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2519-2671

**Дослідження стоншування в місцях вигину і зміна ширини вихідної заготовки / О. І. Тришевський, А. Г. Крюк, С. Ю. Плеснецов** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – № 30(1202). – С. 73–78. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2519-2671

**Thinning research in places of a bend and change of width of the initial purveyance / O. I. Trishevsky, A. G. Kryuk, S. Yu. Plesnetsov** // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy. – Kharkiv: NTU «KhPI» – 2016. – No 30 (1202). – P. 74–78. – Bibliogr.: 7 – ISSN 2519-2671

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Тришевський Олег Ігоревич** – доктор технічних наук, професор, Харківський національний технічний університет сільського господарства ім. П. Василенко, завідувач кафедри «Технологія матеріалів» тел. 050-407-26-11, e-mail: 3shev@ukr.net.

**Тришевський Олег Ігоревич** – доктор технічних наук, професор, Харківський національний технічний університет сільського господарства ім. П. Василенко, завідувач кафедри «Технологія матеріалів» тел. 050-407-26-11, e-mail: 3shev@ukr.net.

**Trishevskiy Oleh Igorovic** – 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.

**Крюк Анатолій Григорьевич** – кандидат технічних наук, професор кафедри «Естественные науки и технологии» Харківського національного економічного університету імені Семена Кузнеця, г. Харків; тел.: (057) 7020265 (доп. 328); e-mail: kافتtech@hneu.edu.ua.

**Крюк Анатолій Григорьевич** – кандидат технічних наук, професор кафедри «Природничі науки та технології» Харківського національного економічного університету імені Семена Кузнеця, м. Харків; тел.: (057) 7020265 (доп. 328); e-mail: kافتtech@hneu.edu.ua.

**Kryuk Anatoliy Grigorievich** – PhD, professor of "Science and Technology" Kharkiv National Economic University named after Semen Kuznets on Kharkiv; tel. (057) 7020265 (доп. 328); e-mail: kافتtech@hneu.edu.ua

**Плеснецов Сергей Юрьевич** – ассистент кафедры ПМНК, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт» (НТУ «ХПИ»), тел. 050-841-30-09, e-mail: plesnetsov@gmail.com.

**Плеснецов Сергій Юрійович** – ассистент кафедры ПМНК, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» (НТУ «ХПІ»), тел. 050-841-30-09, e-mail: plesnetsov@gmail.com

**Plesnetsov Sergey Yurevich** – ассистент kafedry PMNK, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute" (NTU «KHPI»), tel. 050-841-30-09, e-mail: plesnetsov@gmail.com.



УДК. 621. 771. 01

**М. Н. ШТОДА, С. В. ЕРШОВ, К. Г. ГЕЙМУР, В. М. САМОХВАЛ, С. Ю. ГАВРИЛИН****УШИРЕНИЕ ПРИ ПРОКАТКЕ В КАЛИБРАХ ВЫТЯЖНОЙ СИСТЕМЫ «ОВАЛ – КРУГ»**

У статті описані результати експериментального дослідження залежності коефіцієнта розширення при прокатці в калібрах витяжної системи «овал – круг» в умовах високошвидкісного десятикільцевого дрогового блоку стану 400/200 ПАТ «Дніпровський меткомбінат». Для дослідження заповнення овальних і круглих калібрів високошвидкісного чистового десятикільцевого дрогового блоку, були обрані калібри, які використовуються для виробництва катанки  $\varnothing 5,5$  мм, так як вони дозволяють охопити більшість типорозмірів овальних і круглих калібрів чистового блоку. На підставі статистичного аналізу отримано узагальнені формули для розрахунку коефіцієнта розширення при прокатці овальних штаб в круглих калібрах і круглих штаб в овальних калібрах. В рамках роботи було виконано аналіз впливу температури металу перед прокаткою на коефіцієнт розширення при прокатці в калібрах системи «овал – круг». Взаємозв'язок між коефіцієнтом розширення і температурою металу перед прокаткою в досліджуваному діапазоні температур не простежується.

**Ключові слова:** система калібрів «овал – круг», дроговий блок, коефіцієнт множинної кореляції, графік Парето, узагальнена формула для розрахунку коефіцієнта розширення, температура металу

В статье описаны результаты экспериментального исследования зависимости коэффициента уширения при прокатке в калибрах вытяжной системы «овал – круг» в условиях высокоскоростного десятиклетьевого проволочного блока стана 400/200 ПАО «Днепровский меткомбинат». Для исследования заполнения овальных и круглых калибров высокоскоростного чистового десятиклетьевого проволочного блока, были выбраны калибры, используемые для производства катанки  $\varnothing 5,5$  мм, так как они позволяют охватить большинство типоразмеров овальных и круглых калибров чистового блока. На основании статистического анализа получены обобщенные формулы для расчета коэффициента уширения при прокатке овальных полос в круглых калибрах и круглых полос в овальных калибрах. В рамках работы был выполнен анализ влияния температуры металла перед прокаткой на коэффициент уширения при прокатке в калибрах системы «овал – круг». Взаимосвязь между коэффициентом уширения и температурой металла перед прокаткой в исследуемом диапазоне температур не прослеживается.

**Ключевые слова:** система калибров «овал – круг», проволочный блок, коэффициент множественной корреляции, график Парето, обобщенная формула для расчета коэффициента уширения, температура металла

In article is represented the results of experimental researches of dependence of the spreading coefficient during rolling in calibers of elongation system «oval – round» in the high-speed wire rod ten-stand block of 400/200 rolling mill PJSC «Dneprovsky Integrated Iron&Steel Works». For study of the filling of oval and round caliber of high-speed wire rod ten-stand block were selected gauges which are used for the production of wire rod  $\varnothing 5,5$  mm, as they allow to cover most sizes of round and oval calibers of finishing block. Based on statistical analysis was obtained the generalized formula for the calculation of the spreading coefficient when rolling oval bars in round caliber and round bars in oval calibers. As part of the analysis was performed analysis of influence of metal temperature before rolling on spreading coefficient at rolling in calibers system «oval – round». The relationship between the spreading coefficient and the temperature of the rolled strip before to rolling in the temperature range was not noticed.

**Keywords:** the system of caliber «oval – round », the wire rod block, multiple correlation coefficient, Pareto chart, a generalized formula for calculating the spreading coefficient, metal temperature

**Введение.** Среди вопросов, изучаемых в рамках развития теории продольной прокатки в калибрах, вопрос определения зависимости величины уширения прокатываемой полосы от технологических факторов процесса является одним из наиболее часто встречающихся. Это объясняется двумя причинами. Во-первых, это связано с легкостью изучения, так как определение величины уширения требует только знаний формы и размера заготовки, калибра и профиля после прокатки. Во-вторых, бесспорна важность и необходимость достоверных знаний о величине поперечной деформации при сортовой прокатке. Это делает данный вопрос актуальным для любого этапа развития теории продольной прокатки в калибрах.

Как отмечено в работе [1], основными задачами при производстве готового проката являются получение проката заданных размеров и формы с максимально возможной производительностью и с наименьшими затратами при высоком качестве продукции. От себя скажем, что решение этих

вопросов на практике невозможно без знания величины уширения в каждом проходе.

В статье описаны результаты экспериментального исследования зависимости коэффициента уширения при прокатке полос в калибрах вытяжной системы «овал – круг» в условиях высокоскоростного десятиклетьевого проволочного блока стана 400/200 ПАО «Днепровский меткомбинат». Необходимость проведения таких исследований была вызвана разработкой новых режимов деформаций в чистовом блоке, которые позволяют повысить качество готовой продукции (обеспечить отсутствие лампаса на переднем и заднем конце катанки) и улучшения условий работы прокатного оборудования.

**Анализ состояния вопроса.** Современная теория прокатки в калибрах располагает широкими возможностями для определения величины уширения полосы в очаге деформации. Все их можно объединить в группы трех уровней:

1) формулы для расчета уширения прямоугольных полос на гладкой бочке. По

некоторым подсчетам таких формул имеется более 200. Среди них можно выделить наиболее используемые на постсоветском пространстве формулы, приведенные в работах [2–5];

2) экспериментальные и теоретические формулы для расчета уширения полосы при прокатке в калибре с учетом фактической формы очага деформации. Например, работы [6, 7];

3) результаты математического моделирования (аналитическое, вариационное и другие математические решения физических процессов, протекающих в очаге деформации при прокатке в калибрах, например, работы [8, 9]).

Какой подход использовать решается, исходя из возможностей исследователя и целесообразности, обусловленной сложностью поставленной задачи. Так, при изучении взаимосвязи конечной металлографической структуры готового профиля и технологических параметров процесса прокатки необходимо исследовать температурные условия процесса прокатки во взаимосвязи с деформационным состоянием прокатываемой полосы и с рассмотрением напряженного состояния металла в очаге деформации. Это требует использования либо сложного дорогостоящего исследовательского оборудования (пластометр, тепловизор, тензометрическая станция), либо сложного математического аппарата для моделирования исследуемых процессов. Например, программных пакетов для моделирования процесса прокатки с использованием метода конечных элементов. Для решения большинства практических задач достаточно использования более простых подходов.

**Цель работы** – получение зависимостей для расчета коэффициента уширения при прокатке полос в системе вытяжных калибров «овал – круг».

**Постановка задачи.** Для выполнения поставленной цели необходимо провести экспериментальные исследования зависимости коэффициента уширения от технологических параметров процесса прокатки овальных полос в круглых калибрах и круглых полос в овальных калибрах в условиях высокоскоростного десятиклетьевого проволочного блока стана 400/200 ПАО «Днепропетровский меткомбинат».

**Методы исследований.** Для исследования заполнения овальных и круглых калибров высокоскоростного чистового десятиклетьевого проволочного блока были выбраны калибры, используемые для производства катанки  $\varnothing 5,5$  мм, так как они позволяют охватить большинство типоразмеров овальных и круглых калибров чистового блока. С целью увеличения точности полученных зависимостей для условий работы высокоскоростного чистового проволочного блока стана 400/200 ПАО «Днепропетровский меткомбинат»

экспериментальные исследования были выполнены в условиях, максимально приближенных к производственным. В качестве исходной заготовки использовали обрезь реальных подкатов, прокатываемых на стане в клети 20В при производстве катанки  $\varnothing 5,5$  мм. Заготовки грели при помощи горелок до температуры прокатки в непосредственной близости к блоку и затем прокатывали в исследуемом калибре. Контроль температуры прокатки выполняли оптическим пирометром. Измерения выполнялись до и после прокатки. Часть образцов, прокатанных в одном калибре использовали для исследования заполнения следующего по ходу прокатки калибра.

Опыты проводили при работе блока в «толчковом» режиме при частоте вращения двигателя блока 20 об/мин. Различие уровней скорости прокатки для различных модулей обеспечивали путем установки шайб с овальными калибрами в третий и девятый модули, а для круглых калибров – в четвертый и десятый модули. Измерения размеров образцов до и после прокатки выполняли штангенциркулем с классом точности 0,05 мм. Измерения размеров каждого образца выполняли в трех точках: передняя часть, середина и задняя часть.

Изначально для каждого овального и круглого калибра чистового блока, используемого для производства катанки  $\varnothing 5,5$  мм, был спланирован двухфакторный эксперимент. В качестве факторов выбрали наиболее значимые технологические параметры прокатки, влияющие на уширение: коэффициент высотной деформации  $1,03 \leq m_1 = \frac{h_0}{h_1} \leq 2,173$ ; параметр линейной скорости вращения валков – отношение скорости вращения валков в данном модуле к скорости  $V_{n-10} = 100$  м/с (номинальной скорости вращения валков чистового модуля блока)  $0,0032 \leq m_2 = \frac{V_{ai}}{V_{n-10}} \leq 0,0151$ .

Однако анализ полученных зависимостей показал, что скорость в исследуемом диапазоне не оказывает влияния на параметры деформации при прокатке овальных полос в круглых калибрах и круглых полос в овальных калибрах. При этом, формулы для расчета коэффициента уширения при прокатке в каждом отдельно взятом калибре чистового блока, учитывающие только обжатие в этом калибре, не удовлетворяют требуемой точности. Поэтому было решено получить обобщенные зависимости для расчета коэффициента уширения при прокатке в овальных и круглых калибрах чистового блока в зависимости от основных параметров формы заготовки и калибра.

Для получения обобщенных формул для расчета коэффициента уширения все экспериментальные

данные были сгруппированы в две таблицы, отличающиеся по форме калибра. Данные каждой таблицы обрабатывали в программном пакете Statistica. Таблица исходных данных для анализа процесса прокатки круглой полосы в овальном калибре содержала 380 точек, а таблица исходных данных для анализа процесса прокатки овальной полосы в круглом калибре – 320 точек.

Статистический анализ таблиц исходных данных показал, что при расчете коэффициента уширения полосы при прокатке в обоих типах калибров наиболее значимыми являются следующие параметры:

Круг в овальном калибре	Овал в круглом калибре
$1,030 \leq m_1 = \frac{h_0}{h_1} \leq 2,173$	$1,375 \leq m_1 = \frac{h_0}{h_1} \leq 1,964$
$12,065 \leq m_2 = \frac{D_a}{h_1} \leq 55,339$	$13,960 \leq m_2 = \frac{D_a}{h_1} \leq 48,506$
$1,152 \leq m_3 = \frac{B_k}{b_0} \leq 1,532$	$1,157 \leq m_3 = \frac{B_k}{b_0} \leq 1,474$

Для определения независимых параметров используют следующие размеры калибра и заготовки:  $h_0$  – максимальная высота заготовки;  $h_1$  – максимальная высота полосы после прокатки;  $D_a$  – диаметр валков по буртам;  $B_k$  – ширина калибра;  $b_0$  – максимальная ширина заготовки.

**Результаты исследований.** Результаты обработки экспериментальных данных при помощи инструмента множественная регрессия пакета Statistica для овального калибра приведены в таблице 1. Как следует из полученных данных, между факторами эксперимента и коэффициентом уширения наблюдается довольно тесная связь – коэффициент множественной корреляции превышает 0,7. При этом относительный диаметр валков является наиболее значимым – для него коэффициент корреляции составляет 0,72. Корреляция для коэффициента высотной деформации составляет 0,65, а для относительной ширины – 0,46. График Парето (рис. 1) также показывает, что параметр относительной ширины является незначимым при расчете коэффициента уширения. Однако при отбрасывании этого параметра падает коэффициент множественной корреляции.

Таблица 1 – Значения коэффициентов корреляции между независимыми параметрами и коэффициентом уширения при прокатке круглых полос в овальных калибрах

	$\beta$
$m_1 = \frac{h_0}{h_1}$	0,647501
$m_2 = \frac{D_a}{h_1}$	0,718116
$m_3 = \frac{B_k}{b_0}$	0,457585
$\beta$	1,000000

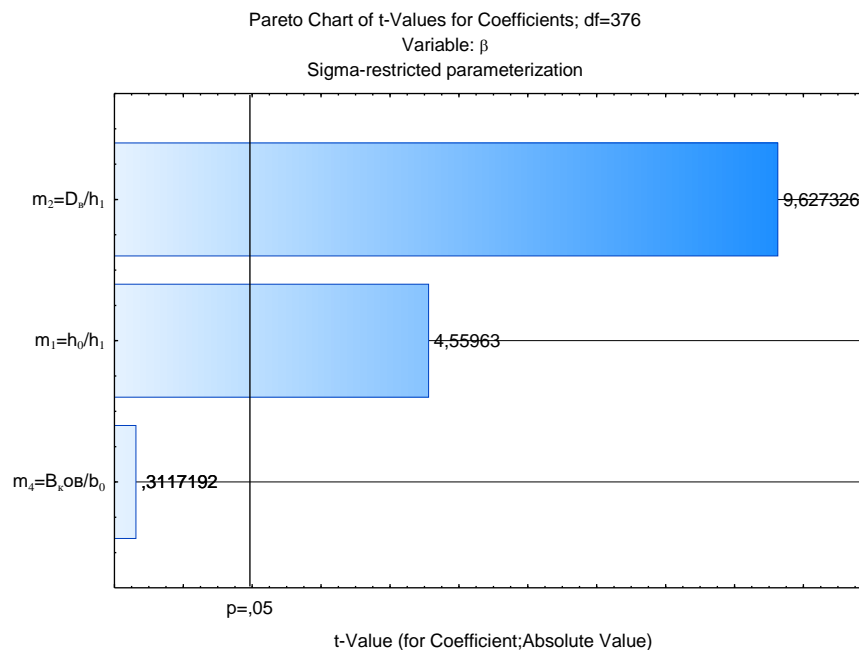


Рис. 1 – График Парето для коэффициента уширения при прокатке круглых полос в овальных калибрах (значимость параметров и степень их влияния на коэффициент уширения)

Поэтому окончательно обобщенная формула для расчета коэффициента уширения при прокатке круглых полос в овальных калибрах высокоскоростного чистового проволочного блока будет иметь вид:

$$\beta = 0,943 + 0,113 \cdot \frac{h_0}{h_1} + 0,004 \cdot \frac{D_g}{h_1} + 0,014 \cdot \frac{B_k}{b_0}.$$

Аналогичным образом при помощи инструмента множественная регрессия пакета Statistica были получены результаты для случая прокатки овальной полосы в круглом калибре (табл. 2). Анализ показывает, что коэффициент множественной корреляции превышает 0,63. Наибольшая корреляция наблюдается между коэффициентами высотной деформации и

уширением. Коэффициент корреляции равен 0,57. Корреляция между коэффициентом уширения и относительным диаметром валков составляет 0,44, а между коэффициентом уширения и относительной шириной полосы – 0,2. График Парето (рис. 2) показывает, что параметр относительной ширины является значимым при расчете коэффициента уширения.

Поэтому окончательно обобщенная формула для расчета коэффициента уширения при прокатке круглых полос в овальных калибрах высокоскоростного чистового проволочного блока будет иметь вид:

$$\beta = 1,134 + 0,493 \cdot \frac{h_0}{h_1} + 0,006 \cdot \frac{D_g}{h_1} - 0,584 \cdot \frac{B_k}{b_0}.$$

Таблица 2 – Значения коэффициентов корреляции между независимыми параметрами и коэффициентом уширения при прокатке овальных полос в круглых калибрах

	$\beta$
$m_1 = \frac{h_0}{h_1}$	0,566900
$m_2 = \frac{D_g}{h_1}$	0,442867
$m_3 = \frac{B_k}{b_0}$	0,200046
$\beta$	1,000000

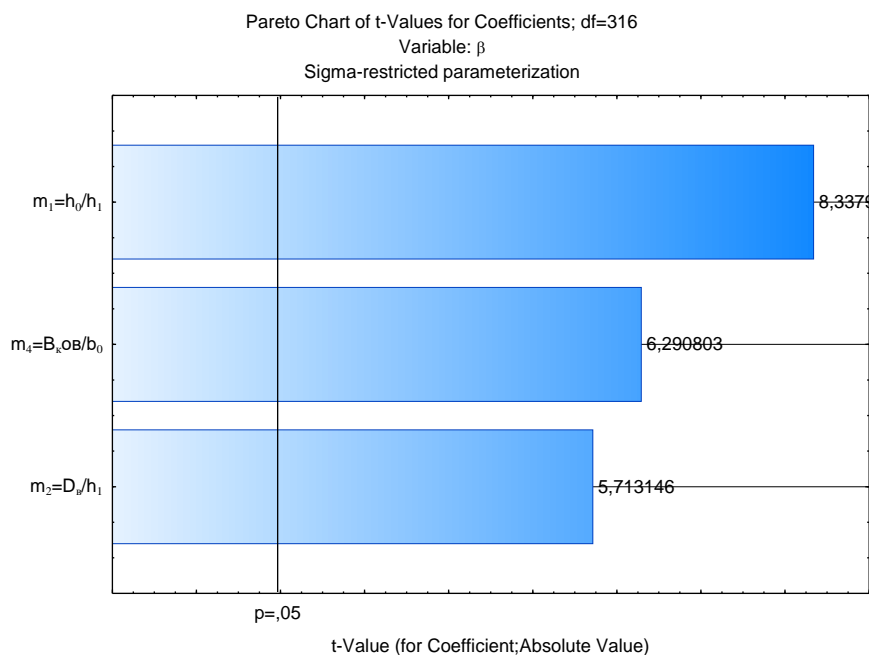


Рис. 2 – График Парето для коэффициента уширения (значимость параметров и степень их влияния на коэффициент уширения) при прокатке овальных полос в круглых калибрах

В рамках работы был выполнен детальный анализ влияния температуры металла перед прокаткой на коэффициент уширения при прокатке в калибрах системы «овал – круг» в условиях высокоскоростного десятиклетьевого проволочного блока стана 400/200 ПАО «Днепропетровский меткомбинат».

Установлено, что при прокатке в первом овальном калибре зависимость между уширением и температурой не наблюдается (рис. 3).

Статистическая обработка полученных данных свидетельствует о том, что распределение значений

температуры не соответствует нормальному закону (рис. 4). Получен довольно широкий диапазон изменения температуры: от 881°C до 1029°C. При среднем значении 943°C, среднеквадратичное отклонение составило 38°C. Но несмотря на это, для коэффициента уширения получено распределение близкое к нормальному (рис. 5) при среднеквадратичном отклонении всего 0,0079. Это свидетельствует об отсутствии влияния температуры на коэффициент уширения при прокатке в первом овальном калибре.

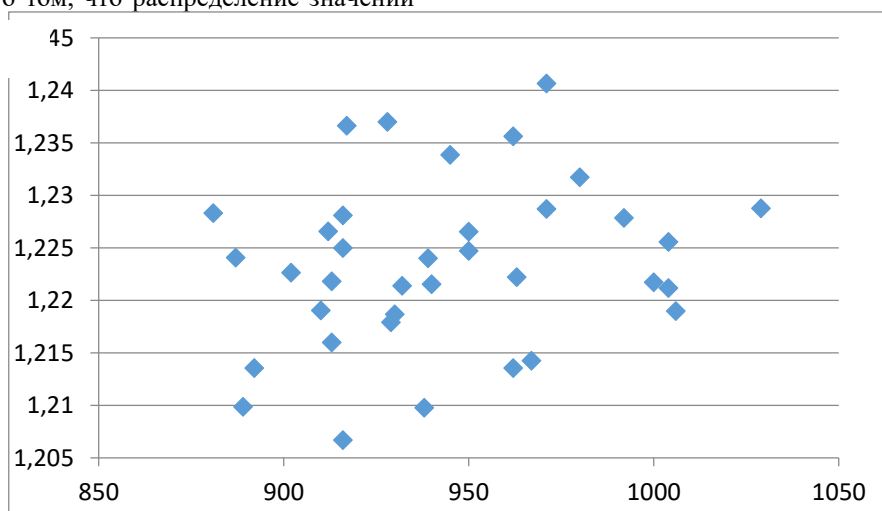


Рис. 3 – Зависимость коэффициента уширения от температуры начала проката

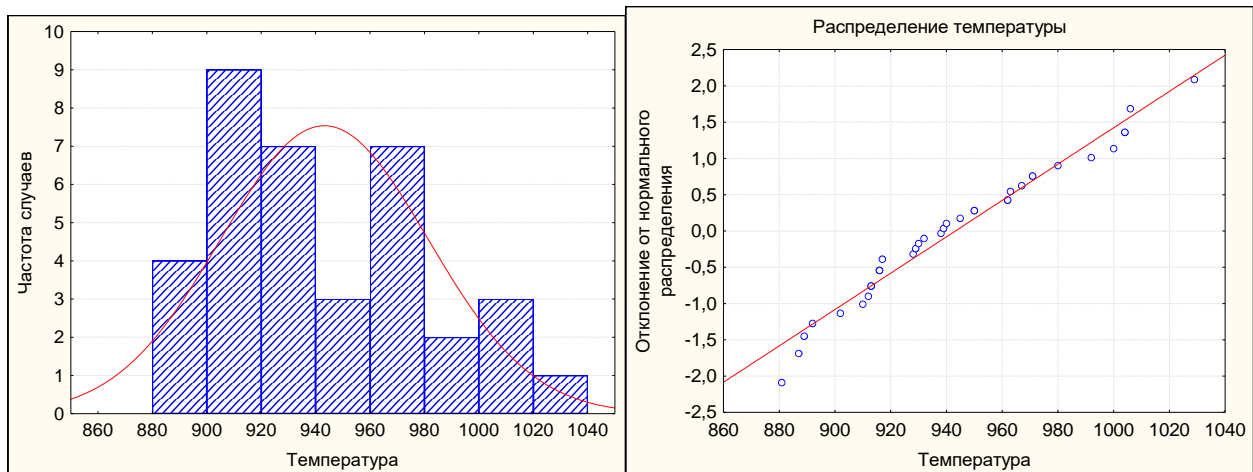


Рис. 4 – Распределение значений температуры металла перед прокаткой при прокатке в первом овальном калибре

Для последующих калибров получены аналогичные данные о влиянии температуры прокатки на коэффициент уширения. Как следует из рис. 6, взаимосвязь между коэффициентом уширения и температурой прокатываемой полосы перед прокаткой не прослеживается. Значения

коэффициентов уширения группируются в двух областях, которые соответствуют типу калибра (рис. 6): для овальных калибров №1 и №3 –  $1,25 \leq \beta \leq 1,35$ ; для круглых калибров №2 и №4 –  $1,17 \leq \beta \leq 1,22$ .

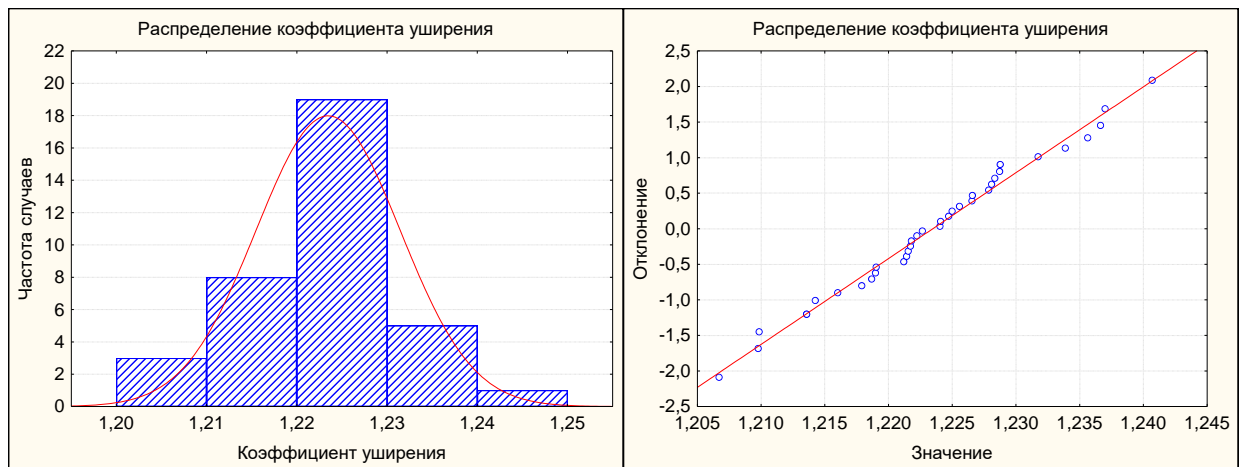


Рис. 5 – Распределение значений коэффициента уширения при прокатке в первом овальном калибре



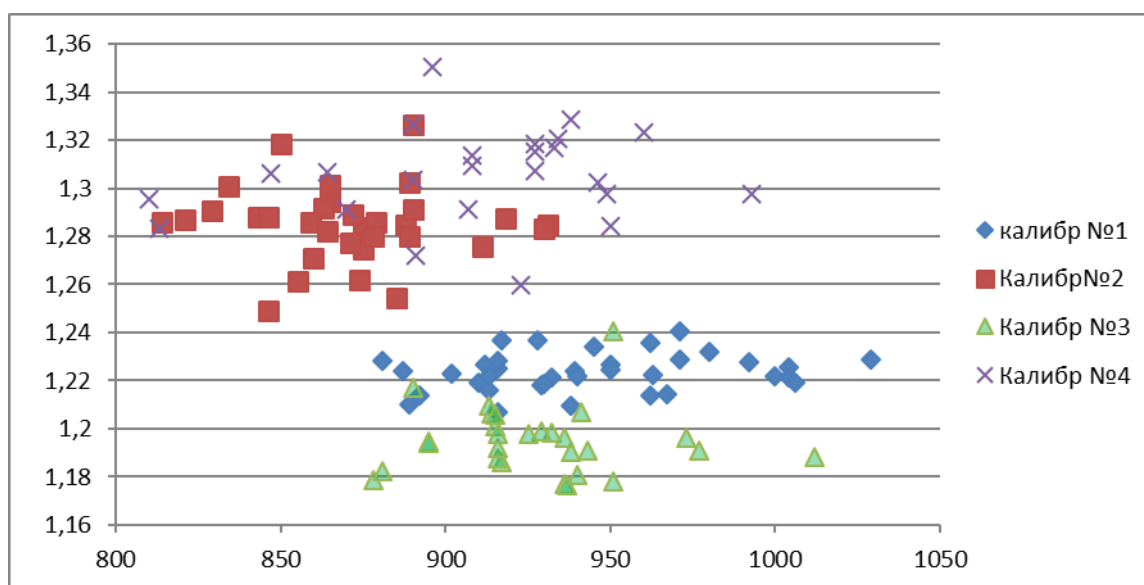


Рис. 6 – Зависимость коэффициента уширения от температуры металла перед прокаткой в первых четырех калибрах высокоскоростного десятиклетьевого проволочного блока стана 400/200 ПАО «Днепропетровский меткомбинат»

**Выводы.** Проведенные экспериментальные исследования заполнения калибров при горячей прокатке в условиях высокоскоростного десятиклетьевого проволочного блока стана 400/200 ПАО «Днепропетровский меткомбинат» позволили получить обобщенные формулы для расчета коэффициента уширения при прокатке овальных полос в круглых калибрах и круглых полос в овальных калибрах.

Установлено отсутствие значимого влияния колебания температуры прокатки в пределах 200 °С на коэффициент уширения при прокатке полос в системе калибров «овал – круг».

Результаты исследований можно использовать при разработке новых режимов настройки чистового проволочного блока стана 400/200 и при расчетах калибровок валков с использованием системы калибров «овал-круг».

#### Список литературы:

1. Илюкович Б.М. Прокатка и калибровка. / Б.М. Илюкович, Н.Е. Нехаев, С.Е. Меркурьев. // Справочник. – Днепропетровск: РИА «Днепр-ВАЛ», 2002. – 506 с.
2. Жез Л. Калибровка валков при прокатке железа и стали. / Л. Жез // Пер. с франц. – Л.: Техника и производство, 1929. – 327 с.
3. Зибель Э. Сопротивление деформации и истечение материала при прокатке. / Э. Зибель. – Stahl und Eisen. – 1910. – №51. – S. 1769-1775.
4. Бахтинов Б.П. Калибровка прокатных валков / Б.П.Бахтинов, М.М.Штернов. – М.: Металлургиздат, 1953. – 784 с.
5. Чекмарев А.П. Калибровка прокатных валков / А.П.Чекмарев, М.С. Мутьев, Р.А. Маишковцев. – М.: Металлургия, 1971. – 512 с.
6. Илюкович Б.М. Влияние формы первого формирующего калибра на коэффициенты вытяжки и уширения / Б.М. Илюкович, М.Н. Штода. // Тематичний збірник наукових праць

«Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні». – Краматорськ, 2002. – С. 366–370.

7. Еришов С.В. Особенности формоизменения металла при прокатке шпунтовой сваи в формирующем калибре с двусторонним обжатием замковых элементов / С.В. Еришов, С.Н. Мельник, В.В. Моспан [и др.] // Краматорск. – Обработка материалов давлением. – 2012. – № 1 (30) – С. 182–187. ISSN 2076-2151

8. Ремез О.А. Исследование влияния факторов прокатки на изменение ширины заготовки в очаге деформации / О.А. Ремез, К.С. Калинин, М.Е. Сабарня [и др.] // Краматорск. – Обработка материалов давлением. – № 3 (28). – 2011. – С. 159–163.

9. Еришов С.В. Исследование деформированного состояния металла при прокатке швеллера в развернутом калибре // С.В. Еришов, С.Н. Мельник, Е.А. Кравченко. // Вісник НТУ «ХП». – 2015. – № 48 (1167). – С. 5-11.

#### References (transliterated):

1. Iljukovich B.M., Nehaev N.E., Merkur'ev S.E. *Prokatka i kalibrovka* [Rolling and roll pass design]. [Spravochnik]. Dnepropetrovsk, RIA «Dnepr-VAL» Publ., 2002. 506 p.
2. Zhez L. *Kalibrovka valkov pri prokatke zheleza i stali* [Roll pass design during rolling iron and steel]. [Per. s frants]. Leningrad. Tehnika i proizvodstvo, Publ., 1929. 327 p.
3. Zibel' Je. *Soprotivlenie deformacii i istechenie materiala pri prokatke* [Strength strain and flowing of the material during rolling]. Stahl und Eisen. 1910. – No. 51. pp. 1769–1775.
4. Bahtinov B.P., Shternov M.M. *Kalibrovka prokatnykh valkov* [Roll pass design]. – Moscow. Metallurgizdat Publ., 1953. 784 p.
5. Chekmarev A.P., Mut'ev M.S., Mashkovcev R.A. *Kalibrovka prokatnykh valkov* [Roll pass design]. Moscow. Metallurgija Publ., 1971. 512 p.
6. Iljukovich B.M., Shtoda M.N. *Vlianie formy pervogo formirujushhego kalibra na koefitsienty vytyazhki i ushirenija* [Influence of form of first forming gauge on reduction and coefficient spreading]. Tematychnyj zbirnyk naukovykh prac' «Udoskonalennya procesiv i obladnannya obrobky ty'skom v metalurgiji i mashynobuduvanni». Kramatorsk, 2002. pp. 366–370.
7. Ershov S.V., Mel'nik S.N., Mospan V.V., Gavrilin S.Yu., Dudka R.M. *Osobennosti formoizmenenija metalla pri prokatke shpuntovoj svai v formirujushhem kalibre s dvustoronnim obzhatiem*

zakmovykh jelementov [Characteristics of metal forming at rolling of encased pile in forming gauge with double-sided reduction of lock elements]. Kramatorsk. Obrabotka materialov davleniem. 2012. no. 1 (30) pp. 182–187. ISSN 2076-2151

8. Remez O.A., Kalinkina K.S., Sabarnja M.E., Samsonenko A.A. *Issledovanie vlijaniya faktorov prokatki na izmenenie shiriny zagotovki v ochage deformacii* [Research of influence factors of

rolling on width of bar change in zone of deformation]. Kramatorsk. Obrabotka materialov davleniem. No. 3 (28). 2011. pp. 159–163.

9. Ershov S.V., Mel'nik S.N., Kravchenko E.A. *Issledovanie deformirovannogo sostojanija metalla pri prokatke shvelleri v razvernutom kalibre* [Research of state strain of metal at rolling of channel in unrolled caliber]. Visnyk NTU "KhPI" [Bulletin of the National Technical University "KhPI"]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2015, No. 48 (1167), pp. 5–11.

Поступила (received) 10.11.2016

*Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions*

**Уширение при прокатке в калибрах вытяжной системы «овал – круг» / М.Н. Штода, С.В. Ершов, К.Г. Геймур, В.М. Самохвал, С.Ю. Гаврилин** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – № 30(1202). – С. 79–87. – Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2519-2671

**Розширення при прокатці в калібрах витяжної системи «овал – круг» / М.М. Штода, С.В. Ершов, К.Г. Геймур, В.М. Самохвал, С.Ю. Гаврилін** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – № 30(1202). – С. 79–87. – Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2519-2671

**Spreading at rolling in calibers elongated system «oval – round» / M.N. Shtoda, S.V. Ershov, K.G. Heimur, V.M. Samokhval, S.Yu. Havrylin** // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy. – Kharkiv: NTU «KhPI» – 2016. – No 30 (1202). – P. 79–87. – Bibliogr.: 9 – ISSN 2519-2671

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Штода Максим Николаевич** – кандидат технических наук, доцент, Днепропетровский государственный технический университет, доцент кафедры ОМД им. Б.М. Илюковича, г. Каменское; тел.: (099) 779-56-26; e-mail: maksshtoda@gmail.com.

**Штода Максим Миколайович** – кандидат технічних наук, доцент, Дніпровський державний технічний університет, доцент кафедри ОМТ ім. Б.М. Ілюковича, м. Кам'янське; тел.: (099) 779-56-26; e-mail: maksshtoda@gmail.com.

**Shtoda Maksim Nikolayevych** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Dniprovsk State Technical University, Associate Professor at the Department of Metal Forming, Kamianske; tel.: (099) 779-56-26; e-mail: maksshtoda@gmail.com.

**Ершов Сергей Владимирович** – доктор технических наук, профессор, Днепропетровский государственный технический университет, заведующий кафедры ОМТ им. Б.М. Илюковича, г. Каменское; тел.: (067) 631-82-76; e-mail: sv.yershov@gmail.com.

**Ершов Сергій Володимирович** – доктор технічних наук, професор, Дніпровський державний технічний університет, завідувач кафедри ОМТ ім. Б.М. Ілюковича, м. Кам'янське; тел.: (067) 631-82-76; e-mail: sv.yershov@gmail.com.

**Yershov Sergey Vladimirovich** – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Dniprovsk State Technical University, Head of Department of Metal Forming, Kamianske; tel.: (099) 779-56-26; e-mail: maksshtoda@gmail.com.

**Геймур Константин Георгиевич** – заместитель начальника прокатного цеха – начальник сортопрокатного стана, ПАО «Днепропетровский меткомбинат», г. Каменское; тел.: (067) 637-68-26

**Геймур Костянтин Георгійович** – заступник начальника прокатного цеху – начальник сортопрокатного стану, ПАТ «Дніпровський меткомбінат», м. Кам'янське; тел.: (067) 637-68-26

**Heimur Konstantin Georgievich** – Deputy Chief of Rolling Shop – Head of Section-rolling Mill, PJSC «Dneprovsky Integrated Iron&Steel Works», Kamianske; tel.: (067) 637-68-26

**Самохвал Владимир Михайлович** – кандидат технических наук, доцент, Днепропетровский государственный технический университет, доцент кафедры ОМД им. Б.М. Илюковича, г. Каменское; тел.: (063) 292-31-42; e-mail: volsamokhval@gmail.com.

**Самохвал Володимир Михайлович** – кандидат технічних наук, доцент, Дніпровський державний технічний університет, доцент кафедри ОМТ ім. Б.М. Ілюковича, м. Кам'янське; тел.: (063) 292-31-42; e-mail: volsamokhval@gmail.com.

**Samokhval Vladimir Mikhailovich** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Dniprovsk State Technical University, Associate Professor at the Department of Metal Forming, Kamianske; tel.: (063) 292-31-42; e-mail: volsamokhval@gmail.com.

**Гаврилін Сергій Юрьевич** – Днепроvский государственный технический университет, ассистент кафедры ОМД им. Б.М. Илюковича, г. Каменское; тел.: (067) 603-91-93; e-mail: sgavrilyn@gmail.com.

**Гаврилін Сергій Юрійович** – Дніпровський державний технічний університет, асистент кафедри ОМТ ім. Б.М. Ілюковича, м. Кам'янське; тел.: (067) 603-91-93; e-mail: sgavrilyn@gmail.com.

**Havrylin Serhii Yuriovich** – Dniprovsk State Technical University, Lecturer at the Department of Metal Forming, Kamianske; tel.: (067) 603-91-93; e-mail: sgavrilyn@gmail.com.

## ЗМІСТ

<b>Алієв І. С., Калюжний В. Л.</b> Визначення параметрів двохперехідного штампування високих конусних виробів з листової заготовки із пластичної міді.....	5
<b>Алиева Л. И.</b> Управление формообразованием деталей с фланцем при холодном выдавливании.....	13
<b>Гайкова Т. В.</b> Конечно-элементная модель деформирования биметаллической заготовки при получении вытяжкой коробчатых деталей.....	21
<b>Горностай В. М., Сабол С. Ф., Потятиник А. М.</b> Тепловий ефект при холодному видавлюванні порожнистих виробів.....	26
<b>Грозенок Е. Д., Симсон Э. А., Степук А. В., Шергин С. Ю.</b> Влияние трения на распределение волокнистой структуры поковки подшипникового кольца при горячей штамповке.....	32
<b>Загорянский В. Г., Дикая Л. Э.</b> Исследование деформаций и силовых параметров при холодной прокатке трехслойных пакетов «медь-алюминий-медь».....	37
<b>Музыкин Ю. Д., Мацко С. В., Москаленко П. П., Татьков В. В.</b> Анализ работы зубчатых передач и пути предупреждения их аварийных отказов на непрерывном тонколистовом стане горячей прокатки 1680 ПАО «Запорожсталь».....	42
<b>Новиков Ф. В., Полянский В. И., Дитиненко С. А.</b> Технологические условия повышения точности механической обработки отверстий.....	49
<b>Носуленко В. І., Шмельов В. М., Юр'єв В. В.</b> Критерій складності отворів як технологічний фактор в умовах РОД.....	56
<b>Пузырь Р. Г., Аргат Р. Г.</b> Измерение деформаций при моделировании радиально-ротационного профилирования ободьев колес методом тензометрирования	63
<b>Тараненко М. Е.</b> Интерактивный контроль штамповки крупногабаритных листовых деталей.....	69
<b>Тришевский О. И., Крюк А. Г., Плесецов С. Ю.</b> Исследование утонения в местах изгиба и изменение ширины исходной заготовки.....	74
<b>Штода М.Н., Еришов С.В., Геймур К.Г., Самохвал В.М., Гаврилин С.Ю.</b> Уширение при прокатке в калибрах вытяжной системы «овал – круг».....	79

**НАУКОВЕ ВИДАННЯ**

**ВІСНИК  
НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО  
УНІВЕРСИТЕТУ «ХП»**

Збірник наукових праць

Серія  
«Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів  
у машинобудуванні та металургії»

***Випуск 30 (1202) 2016***

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:

Обл. вид. № 30-16

Підп. до друку 21.11.2016 р. Формат 60x84 1/16. Папір офсетний. RISO-друк. Гарнітура Таймс.  
Ум. друк. арк. 8,6. Обл.-вид. арк. 8,9.

Наклад 300 прим. Зам. № 17. Ціна договірна.

Видавничий центр НТУ «ХП».

Свідоцтво про державну реєстрацію ДК No 116 от 10.07.2000 р.  
61002, Харків, вул. Фрунзе, 21

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.