

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І  
НАУКИ УКРАЇНИ

Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»

MINISTRY OF EDUCATION  
AND SCIENCE OF UKRAINE

National Technical University  
"Kharkiv Polytechnic Institute"

**Вісник Національного  
технічного університету  
«ХПІ». Серія: Інноваційні  
технології та обладнання  
обробки матеріалів у  
машинобудуванні та  
металургії**

№ 30 (1306) 2018

Збірник наукових праць

Видання засновано у 1961 році

**Bulletin of the National  
Technical University  
"KhPI". Series: Innovative  
technologies and equipment  
handling materials in  
mechanical engineering and  
metallurgy**

No 30 (1306) 2018

Collected Works

The publication was founded in 1961

Харків  
НТУ «ХПІ», 2018

Kharkiv  
NTU "KhPI", 2018

**Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy: зб. наук. пр. / Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». – Харків : НТУ «ХПІ», 2018. – № 30 (1306) 2018. – 96 с. – ISSN 2519-2671.**

Видання присвячене освітленню досягнень в галузі системного аналізу та управління технічними, технікоекономічними і соціальними системами, синтезу систем керування. Публікуються статті, що стосуються розробки інтелектуальних систем, застосування математичного моделювання в техніці, лінгвістиці та економіці, впровадження інформаційних технологій і розробки програмного забезпечення.

Для науковців, викладачів вищої школи, аспірантів, студентів і фахівців в галузі системного аналізу, управління і комп'ютерних технологій.

The publication is devoted to the coverage of achievements in the field of system analysis and management of technical, technoeconomic and social systems, the synthesis of control systems. Articles are published on the development of intelligent systems, the application of mathematical modeling in technic, linguistics and economics, the introduction of information technology and software development.

For scientists, teachers of higher education, post-graduate students, students and specialists in the field of systems analysis, management and computer technology.

Державне видання.

Свідоцтво Держкомітету з інформаційної політики України  
КВ № 5256 від 2 липня 2001 року.

Мова статей – українська, російська, англійська.

*Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії внесено до «Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук», затвердженого Наказом МОН України № 1328 від 21.12.2015 р. «Про затвердження рішень Атестаційної колегії Міністерства щодо діяльності спеціалізованих вчених рад від 15 грудня 2015 року».*

**Офіційний сайт видання:** <http://samit.khpi.edu.ua/Засновник>

Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»

Founder  
National Technical University  
"Kharkiv Polytechnic Institute"

#### **Головний редактор**

Сокол Є. І., д-р техн. наук, чл.-кор. НАН України, НТУ «ХПІ», Україна

#### **Заст. головного редактора**

Марченко А. П., д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПІ», Україна

#### **Секретар**

Горбунов К. О., доц., НТУ «ХПІ», Україна

#### **Редакційна колегія серії**

*Відповідальний редактор:*

А. П. Марченко, д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПІ», Україна

*Заступник відповідального редактора:*

Ю.О. Плеснецов, канд. техн. наук, ст.н.с., НТУ «ХПІ», Україна

*Відповідальний секретар:*

О.А. Юрченко, канд. тех. наук, доц., НТУ «ХПІ», Україна

*Члени редколегії:*

І.С. Алієв, д-р техн. наук, проф. ДГМА, Україна

Г.А. Баглюк, д-р техн. наук, проф., ПІМ НАНУ, Україна

Б.Рюдигер, д-р техн. наук, проф., Німеччина

В.В. Драгобецький, д-р техн. наук, проф., КрНУ, Україна

С.В. Єршов, д-р техн. наук, проф., ДДТУ, Україна

В.Л. Калюжний, д-р техн. наук, проф., НТУУ «КПІ», Україна

В.В. Кузарь, д-р техн. наук, проф., ДВНЗ «ПДТУ», Україна

Р. Г. Пузир, д-р техн. наук, проф., КрНУ, Україна

Б.П. Середа, д-р техн. наук, проф., ДДТУ, Україна

Є.М. Смирнов, д-р техн. наук, проф., СТІ НІТУ «МІСІС», Росія;

Г.М. Сучков, д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПІ», Україна

В.А. Тітов, д-р техн. наук, проф., НТУУ «КПІ», Україна

М.Є. Тараненко, д-р техн. наук, проф., НАУ «ХАІ», Україна

О.І. Тришевський, д-р техн. наук, проф., ХНТУСГ, Україна

С.В. Федоров, д-р техн. наук, проф., КГТУ, Росія

Є.А. Фролов, д-р техн. наук, проф., ПолтНТУ, Україна

В.Хомберг, д-р техн. наук, проф., Магдебурзький ун-т, Німеччина;

В.В. Чигиринський, д-р техн. наук, проф., ДДТУ, Україна

#### **Editor-in-chief**

Sokol E. I., dr. tech. sc., member-cor. of National Academy of Sciences of Ukraine, NTU "KhPI", Ukraine

#### **Deputy editor-in-chief**

Marchenko A. P., dr. tech. sc., prof., NTU "KhPI", Ukraine

#### **Secretary**

Gorbunov K. O., docent, NTU "KhPI", Ukraine

#### **The editorial board of the series:**

*Editor:*

A.P. Marchenko, Dr. of Sciences, professor, NTU "KhPI", Ukraine

*Deputy managing editor:*

Y.O. Plesnetsov, PhD., senior scientist, NTU "KhPI", Ukraine

*Secretary:*

O.A. Yurchenko, PhD., sciences assoc., NTU "KhPI", Ukraine

*Members of the Editorial Board:*

I.S. Aliev, Dr. of Sciences, professor, DSEA, Ukraine

G.A. Bagluk, Dr. of Sciences, professor, IPMS NASU, Ukraine

B.Ryudyher, Dr. of Sciences, professor, Germany

V.V. Drahobetsky, Dr. of Sciences, professor, KNU, Ukraine

S.V. Ershov Dr. of Sciences, professor, DSTU, Ukraine

V.L. Kalyuzhny, Dr. of Sciences, professor, NTUU "KPI", Ukraine

V.V. Kukhar, Dr. of Sciences, professor, PSTU, Ukraine

R.G. Puzyr, Dr. of Sciences, professor, KNU, Ukraine

B.P. Sereda, Dr. of Sciences, professor, DSTU, Ukraine

E.M. Smirnov, Dr. of Sciences, professor, STI NITU "MISiS", Russia

G.M. Suchkov, Dr. of Sciences, professor, NTU "KhPI", Ukraine

M.E. Taranenko, Dr. of Sciences, professor, NAU "KhAI", Ukraine

V.A. Titov, Dr. of Sciences, professor, NTUU "KPI", Ukraine

O.I. Trishevsky, Dr. of Sciences, professor, KhNTUA, Ukraine

S.V. Fedorov, Dr. of Sciences, professor, KSTU, Russia

E.A. Frolov, Dr. of Sciences, professor, PNTU, Ukraine

V. Homberh, Dr. of Sciences, professor, MOGU, Germany

V.V. Chigirinsky, Dr. of Sciences professor, DSTU, Ukraine

Рекомендовано до друку Вченою радою НТУ «ХПІ».  
Протокол № 8 від 02 листопада 2018 р.

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», 2018

УДК 621.777.04

*Л. І. АЛІЕВА, Д. О. КАРТАМИШЕВ, К. Д. МАХМУДОВ, О. В. ЧУЧИН***ЕНЕРГОСИЛОВІ ПАРАМЕТРИ ПРОЦЕСІВ ХОЛОДНОГО ВИДАВЛЮВАННЯ ПОРОЖНИСТИХ ДЕТАЛЕЙ**

Технологічні способи холодного об'ємного штампування видавлюванням є ефективним методом отримання порожнистих деталей типу стаканів і гільз. Основним обмежуючим фактором для даної технології є високі значення енергосилових параметрів. Розглянуто різні шляхи зниження енергосилових параметрів при виготовленні порожнистих деталей, серед яких можна виділити застосування схем комбінованого видавлювання, полегшуючих камер і порожнин, що забезпечують підвищення ступеня свободи течії матеріалу. Для полегшення силового режиму процесів деформування ефективно зниження жорсткості схем напруженого стану заготовки за рахунок використання прийомів кінематичного впливу у вигляді переважної радіальної течії металу. Проведено комп'ютерні та експериментальні дослідження з метою зіставлення сил деформування при виготовленні порожнистих деталей типу стакану з алюмінієвого сплаву АД31 способами комбінованого видавлювання з роздачею. Виготовлення порожнистих деталей за схемами радіально-прямого видавлювання з розвинутою радіальною течією матеріалу дозволяє не тільки знизити сили деформування в порівнянні з поздовжнім видавлюванням, але і забезпечити необхідну якість поверхонь деталей. Встановлено, що виготовлення порожнистих деталей способами «безматричного» видавлювання дозволяє знизити сили деформування в порівнянні з радіально-прямим видавлюванням заготовок того ж діаметру. Але при цьому отриманий напівфабрикат деталі вимагає застосування додаткових операцій витяжки з стоншенням або протягування.

**Ключові слова:** порожні деталі, схеми деформування, видавлювання з роздачею, комбіноване видавлювання, сили деформування, експериментальна оцінка.

*Л. И. АЛИЕВА, Д. А. КАРТАМЫШЕВ, К. Д. МАХМУДОВ, О. В. ЧУЧИН***ЭНЕРГОСИЛОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПРОЦЕССОВ ХОЛОДНОГО ВЫДАВЛИВАНИЯ ПОЛЫХ ДЕТАЛЕЙ**

Технологические способы холодной объемной штамповки выдавливанием являются эффективным методом получения полых деталей типа стаканов и гильз. Основным ограничивающим фактором для данной технологии является высокие значения энергосиловых параметров. Рассмотрены различные пути снижения энергосиловых параметров при изготовлении полых деталей, среди которых можно выделить применение схем комбинированного выдавливания, облегчающих камер и полостей, обеспечивающих повышение степени свободы истечения материала. Для облегчения силового режима процессов деформирования эффективно снижение жесткости схем напряженного состояния заготовки за счет использования приемов кинематического воздействия в виде преимущественного радиального истечения металла. Проведены компьютерные и экспериментальные исследования с целью сопоставления сил деформирования при изготовлении полых деталей типа стакана из алюминиевого сплава АД31 способами комбинированного выдавливания с раздачей. Изготовление полых деталей по схемам радиально-прямого выдавливания с развитым радиальным течением материала позволяет не только снизить силы деформирования в сравнении с продольным выдавливанием, но и обеспечить требуемое качество поверхностей деталей. Установлено, что изготовление полых деталей способами «безматричного» выдавливания позволяет снизить силы деформирования по сравнению с радиально-прямым выдавливанием заготовок того же диаметра. Но при этом полученный полуфабрикат детали требует применения дополнительных операций вытяжки с утонением или протяжки.

**Ключевые слова:** полые детали, схемы деформирования, выдавливание с раздачей, комбинированное выдавливание, силы деформирования, экспериментальная оценка.

*L. I. ALIEVA, D. O. KARTAMYSHEV, K. D. MAHMUDOV, O. V. CHUCHIN***ENERGY-POWER PARAMETERS OF COLD-EXTRACTING PROCESSES OF THE HOLLOW PARTS**

Technological methods of cold forging by extrusion are an effective method for producing hollow parts such as cups and sleeves. The main limitations for this technology are high values of energy-power parameters. Various ways to reduce energy-saving parameters in the manufacture of materials are considered, among which it is possible to single out means that contribute to increased efficiency, safety and accessibility, to facilitate the force mode of the deformation process, effectively reducing the rigidity of payments through the use of kinematic techniques in the form of technological radial flow of metal. Computer and experimental studies with obtaining comparisons of the deformation forces in the manufacture of hollow parts like glass made of aluminum alloy AD31 of the types of combined extrusion with distribution is conducted. Production of hollow parts according to radial-forward extrusion schemes with developed radial flow of material is considered to remove the deformation forces in comparison with the longitudinal extrusion, but also to ensure the required quality of the surfaces of the parts. It was established that the manufacture of hollow parts using "matrix-free" extrusion reduces the extrusion load compared with radial-direct extrusion of blanks of the same diameter. But at the same time, the obtained semi-finished part requires the use of additional operations with thinning or drawing.

**Keywords:** extrusion with expansion, combined extrusion, hollow part, deformation scheme, deformation force, experimental evaluation.

**Вступ.** Холодне об'ємне штампування застосовується для виготовлення прецизійних деталей складної форми, але малих розмірів з металів, що володіють високою пластичністю. Відсутність нагріву дозволяє отримати більш точні деталі і з чистішою поверхнею. Підвищення питомих і повних навантажень, що діють на формують інструмент, є істотним чинником, що стримує поширення процесів холодного деформування у виробництві. Тиск деформування здатний у п'ятикратному розмірі перевищувати напруження

текучості матеріалу заготовки, що значно знижує надійність роботи штамів і стійкість деформуючого інструменту [1–3].

Ефективним способом оптимізації силового режиму процесів деформування, зниження тисків і сил формоутворення деталей є пошук і вивчення нових схем штампування. Поряд з цим, в технологіях ХОШ відомий цілий ряд засобів, спрямованих на зниження енергосилових параметрів деформування: видавлювання з активними силами тертя, деформування із застосуванням ультразвукових

© Л. І. Алієва, Д. О. Картамишев, К. Д. Махмудов, О. В. Чучин, 2018

коливань, комбіноване деформування (видавлювання, навантаження) заготовки, локальне деформування, видавлювання з роздачею, видавлювання з натягом [3–8]. Вище зазначені способи дозволяють розширити технологічні можливості процесів холодного видавлювання, а значить підвищити стійкість штампового інструменту, якість деталей, складність і точність їх форми [2, 3, 8, 9].

У способах видавлювання з роздачею, яким властиво збільшення діаметральних розмірів заготовки в ході деформування, поряд з відомими процесами (наприклад, деформування з полегшувачами камерами, «безматричне» видавлювання, штампування з роздачею), можна віднести менш поширений, але ефективний спосіб зниження сили деформування з характерної розвиненої радіальної течією деформованого матеріалу – комбіноване послідовне радіально-пряме видавлювання [10–13].

Останнім часом ряд досліджень присвячено оцінці силового режиму, встановленню характеру впливу технологічних факторів і коефіцієнта тертя на енергосилові параметри процесів комбінованого видавлювання. Теоретичне вивчення процесу виготовлення порожнистих деталей способом радіально-прямого видавлювання з роздачею дозволяє судити про можливе істотне зниження силових параметрів (до декількох разів) у разі реалізації на практиці переваг радіально-прямого видавлювання [7, 12–14]. Значна кількість робіт, що описують запропоновані нові способи та силовий режим процесів містять в основному результати теоретичного аналізу і комп'ютерного моделювання без зіставлення силових параметрів нових способів комбінованого і традиційних схем поздовжнього видавлювання [11–13].

**Формулювання мети досліджень.** Метою даної роботи є узагальнення способів видавлювання з роздачею на основі поздовжнього і комбінованого радіально-поздовжнього видавлювання і порівняння силових параметрів видавлювання порожнистих деталей типу стакану різними технологічними способами.

**Викладання основного матеріалу дослідження.** Прийоми силового і кінематичного впливу на деформуючу заготовку (комбіноване деформування, роздача металу, створення полегшувачів камер і ін.), які використовуються для зниження сил деформування при холодному видавлюванні, спрямовані на підвищення ступеня свободи течії металу і, як наслідок, викликають зміну схеми напружено-деформованого стану заготовки.

Розглянемо спочатку різновиди технологічних прийомів і способів (рис. 1), покликаних знизити сили штампування в найбільш поширених і енергоємних процесах видавлювання порожнистих деталей. Характерним прикладом застосування способів комбінованого видавлювання з роздачею при отриманні порожнистих деталей є схеми деформування з додатковою (переважно радіальною) течією матеріалу в полегшувачі камери (рис. 1, ряд А) [1, 4, 9]. Роздача деформованого матеріалу при зворотному видавлюванні відбувається в камери («кишенки»), передбачені в заготовці (схеми А2–А4), в матриці (схеми В1–В2).

Полегшуючі камери змінюють характер течії матеріалу, збільшують граничну ступінь деформації і гідростатичний тиск [4]. Крім цього, створення полегшувачів камер в заготовці вимагає попередніх формотворчих операцій. У деяких випадках це можна зробити при супутньому калібруванні вихідної заготовки, а також забезпечити шляхом вибору профільованого вихідного прокату. Схеми видавлювання порожнин з полегшувачами камерами для зниження робочих сил реалізовані на практиці в процесах виготовлення видавлюванням гравюр матриць [4, 9].

По суті способу комбінованого видавлювання (схеми В1–В2) заготовка піддається додатковому кінематичному (не силовому) впливу, що полягає в збільшенні ступеня свободи течії металу із замкнутої порожнини. Забезпечення двостороннього і трестороннього видавлювання має вирішальне значення для зниження гідростатичного тиску в осередку деформації, і крім того, введення радіальної течії принципово змінює схему НДС: замість всебічного стиснення реалізується різнойменна схема напруженого стану, що істотно знижує значення тисків і сил деформування. З цієї точки зору також цікаві способи поздовжнього суміщеного (зворотно-прямого) видавлювання (схема В4) і зворотного видавлювання з роздачею в рухомій матриці (схема С3).

Способи видавлювання з роздачею є модифікацією процесу прямого видавлювання стакану шляхом забезпечення суміщеної радіальної течії металу в осередку деформації. Ці способи іноді називають «безматричним» видавлюванням (схема D1) [7] або схемою Куногі [9]. У процесі вільного (без спрямування матрицею) видавлювання можна виготовляють глибокі порожнисті судини з мінімальними навантаженнями [7]. Але деталі типу гільз (глибоких стаканів) остаточно треба формувати калібруванням – протяжкою.

Спосіб отримання порожнистих виробів з суцільної заготовки в результаті радіального видавлювання, що змінюється по ходу течією в зворотному або прямому напрямку деформованого металу (схеми D2–D4) є новим методом отримання порожнистих деталей [11–14]. Процес виготовлення пустотілих виробів за цими схемами названий комбінованим послідовним радіально-прямим видавлюванням також відноситься до процесів з розвиненої радіальної течією металу. Реалізація цих способів деформування може дозволити знизити сили деформування як за рахунок зменшення площі контакту активного деформуючого інструменту із заготовкою, так і за рахунок різнойменної схеми напружено-деформованого стану [11, 15].

З точки зору оптимізації силового режиму становить інтерес застосування способів деформування, що дозволяють максимально використовувати ресурс пластичності матеріалу за рахунок реалізації схем напруженого стану оптимальної жорсткості в поєднанні зі зменшеними навантаженнями.

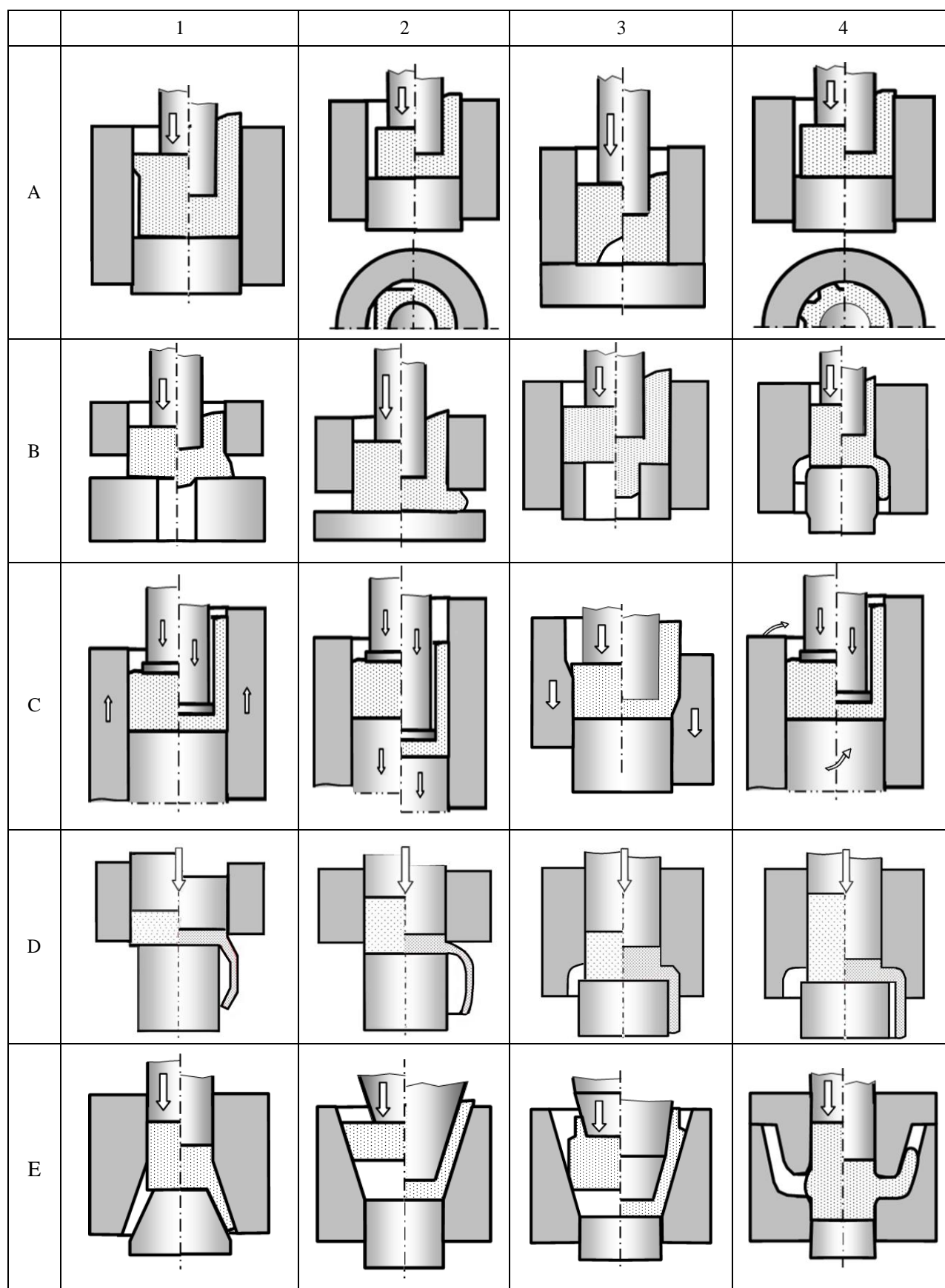


Рис. 1 – Процеси видавлювання з роздачею

При виготовленні конічних стаканів для створення сприятливих умов деформування в умовах впливу розтягуючих напружень видавлювання металу здійснюють у звужуючий зазор між матрицею і нижнім пуансоном (схема Е1) [2, 5, 6].

Використання комбінованого суміщеного видавлювання при виготовленні деталей типу «стакан» з конічною формою внутрішньої і зовнішньої бічних поверхонь дозволяє знизити питомі сили, підвищити продуктивність і розширити асортимент одержуваних деталей. Забезпечення двостороннього течії металу (одночасно вгору і вниз) дозволяє знизити силу видавлювання на 30-35% (схема Е2).

Застосування профільованих заготовок з центрувальним конусним паском для комбінованого деформування (видавлювання зі зсувом і роздачею) дозволило істотно знизити різностійкість і підвищити стійкість пуансонів (схема Е3) [9]. До обмежень деформування за цими двома схемами можна віднести необхідність попереднього профілювання заготовок та підбір оптимальної форми заготовки, установлюваної, як правило, експериментальним шляхом для забезпечення двостороннього течії металу протягом всього процесу. Спосіб послідовного радіально зворотного видавлювання (схема Е4) не вимагає спеціальної підготовки заготовок і може бути рекомендований для отримання конічних чашок.

Типовою схемою штампування з розвинутою радіальною течією (роздачею) деформованого матеріалу є спосіб радіального видавлювання фланців [9, 11], що відрізняється менш жорсткою схемою напруженого стану. Розвитком даного способу є доповнення його елементами поздовжньої течії, що дозволило отримувати в комбінованому процесі

порожнисті вироби з суцільних заготовок. У порівнянні з традиційними способами поздовжнього видавлювання, таке поєднання повинно було привести до помітного зниження енергосилових параметрів. Цікавим є зіставлення силових характеристик процесів поздовжнього і комбінованого послідовного радіально-прямого видавлювання порожнистих деталей.

Математичне моделювання процесів видавлювання порожнистих деталей проводилося методом скінчених елементів (МСЕ) у програмі Qform VХ. Матеріал АД31, значення коефіцієнта тертя  $\mu = 0,04$ .

У разі «безматричного» видавлювання (рис. 2) здійснювалося варіювання перекриття (зазору) з між пуансоном і матрицею з метою дослідження його впливу на силові параметри процесу. Розглянуті варіанти, при яких величина  $z$  більше 0 (рис. 2, а),  $z$  менше 0 (рис. 2, б). Для вивчення повної картини дані схеми були зіставлені зі схемою з  $z = 0$ . (рис. 2, в)

Додатний зазор між пуансоном і матрицею сприяє вільному прямому витіканню металу (див. рис. 2, а). При нульовому зазорі (див. рис. 2, б) спостерігається незначне радіальне відхилення відростка; в свою чергу відмінний зазор сприяє течії металу в радіальному напрямку з поступовим вирівнюванням під вагою матеріалу.

У схемах «безматричного» видавлювання до найбільших величин інтенсивності напружень схильні шари металу, що розташовані в зоні розвороту течії матеріалу, тобто в осередку інтенсивної деформації (рис. 2).

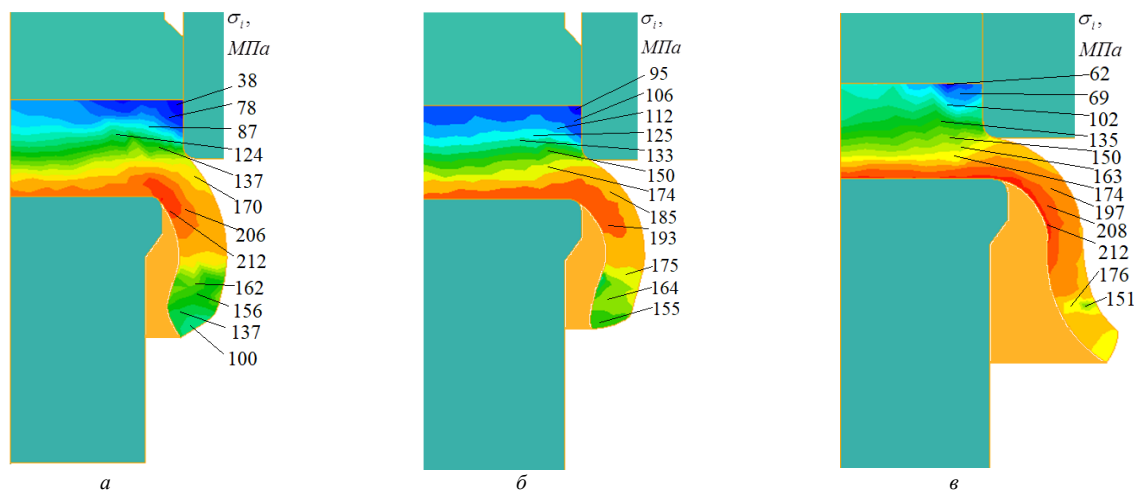


Рис. 2 – Математичне моделювання МСЕ схем «безматричного» видавлювання з величиною перекриття між пуансоном і матрицею: а –  $z > 0$ ; б –  $z = 0$ ; в –  $z < 0$

Вивчено вплив зазору  $z$  також для схем радіально-прямого видавлювання. МСЕ дозволив отримати характер напружено-деформованого стану і величину сил деформування для заготовок різного діаметру а, б – 28 мм, в, г – 15 мм, а також дослідити вплив зміни товщини стінки заготовки за рахунок зменшення діаметру контрпуансону (рис. 3, б, г).

Найбільш значній деформації піддаються шари металу, що примикають до дна і внутрішньої поверхні порожнини стакану. Великі значення інтенсивності напружень концентруються в шарі матеріалу заготовок поблизу внутрішнього радіуса стакану, а менші – в шарі поблизу зовнішнього радіуса. Збільшення товщини стінки стакану (рис. 3, б, г) не дає суттєвого впливу на характер розподілу напружено-деформованого стану заготовки.

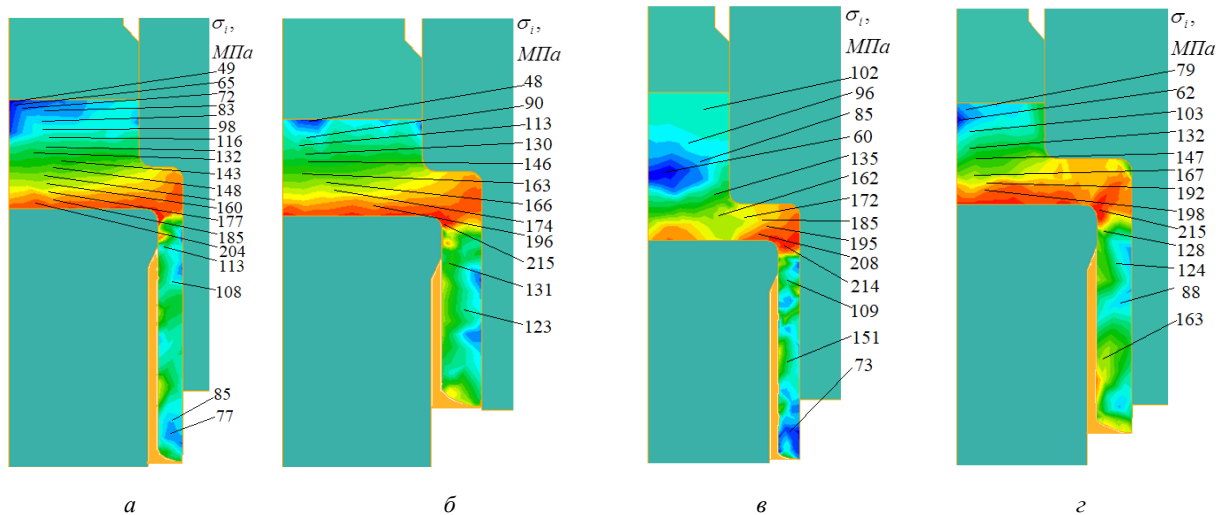


Рис. 3 – Математичне моделювання процесу радіально-прямого видавлювання

Проводилося зіставлення експериментальних даних з результатами математичного моделювання (рис. 4) методом кінцевих елементів для схеми (див. рис. 3, в) радіально-прямого видавлювання з роздачею.

Характер зміни сили деформування по ходу процесу послідовного радіально-прямого видавлювання порожнистих деталей відрізняється нестационарністю та може бути поділений на три характерних етапи: безперервне зростання сили на початковій стадії радіального витікання, подальший

розворот течії металу з радіального на прямий напрямок та встановлена стадія досліджуваного процесу з постійною величиною сили деформування, яка починається після розвороту течії металу і триває до остаточного оформлення порожнистої деталі.

Характер змін тиску деформування по ходу процесу радіально-прямого видавлювання пустотілих деталей у порівнянні з МСЕ-моделлю якісно і кількісно приблизний із експериментальними даними.

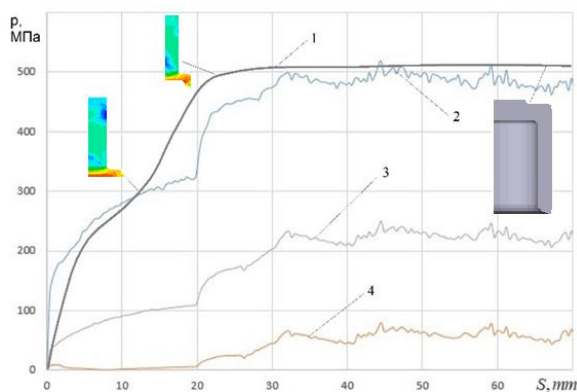


Рис. 4 – Співставлення розрахункових (МСЕ) та експериментальних значень тиску для радіально-прямого видавлювання (сплав АД31) (1 – експеримент, 2 – пуансон, 3 – контрпуансон, 4 – матриця)

На графіках залежності сил деформування від робочого ходу повзуна для різних способів холодного видавлювання (рис. 5) деталі 1–3 були отримані для схем прямого (без матриці) видавлювання з роздачею з різною величиною перекриття  $z$ , 1 –  $z < 0$ , 2 –  $z > 0$ , 3 –  $z = 0$ , 4 – радіально-прямим видавлюванням для заготовки з діаметром 28 мм, 5 – радіально-прямим видавлюванням для заготовки з діаметром 28 мм зі збільшенням товщини стінки стакану за рахунок зменшення діаметру контрпуансону, 6 – радіально-прямим видавлюванням для заготовки з діаметром

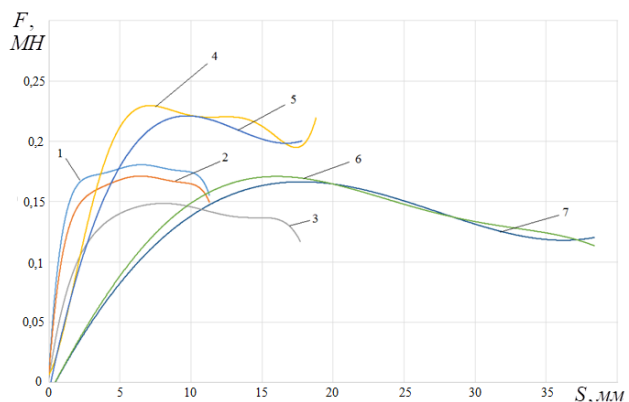


Рис. 5 – Графіки залежності сил деформування від робочого ходу по способам видавлювання порожнистої деталі зі сплаву АД31

15 мм, 7 – радіально-прямим видавлюванням з діаметром заготовки 15 мм зі збільшенням товщини стінки стакану за рахунок зменшення діаметру контрпуансону.

Для експериментального дослідження силового режиму застосовувалися циліндричні мірні заготовки висотою від 12 до 45 мм з діаметрами 15,0 мм, 21,0 мм і 28,0 мм, отримані з сортового прокату алюмінієвого сплаву АД31.

Висота заготовок підбиралася з розрахунку сталості їх обсягів. Перед видавлюванням зразки зі сплаву АД31 піддавалися відпалу протягом 40 хвилин



в печі, нагрітої до температури 400°C. Як мастила був використаний тваринний жир. Порожні деталі типу стакану мали товщину стінки – 2 мм, товщину дна – 3 мм, зовнішній діаметр – 28 мм і висоту – 36 + 1 мм. Для дослідження макроструктури, отримані в процесі видавлювання порожні деталі розрізали уздовж осі, і після попередньої підготовки меридіональні поверхні деталей протрують в 5% розчині NaOH при температурі 70°C. Експериментальні дослідження проводилися на випробувальній машині МС-2000.

Як видно з графіка (рис. 5), найбільша сила деформування характерна для схем радіально-прямого видавлювання (криві 4 і 5) з діаметром заготовки 28 мм. Сила деформування по ходу процесу для цих схем відрізняється незначно. Пряме (без матриці) видавлювання (крива 1) з величиною перекриття  $z < 0$  дозволяє знизити силу деформування на 38% в порівнянні з радіально-прямим видавлюванням (крива 4) для того ж діаметру заготовки. У процесі вільного (без матриці) видавлювання (крива 3) з величиною перекриття  $z = 0$  дозволяє знизити сили деформування на 12% в порівнянні зі схемою «безматричного» видавлювання при перекритті  $z < 0$  і на 8% при перекритті  $z > 0$ . При цьому питома сила знижується в 1,5 рази в порівнянні з традиційним способом виготовлення подібних деталей холодним зворотним видавлюванням за рахунок зниження в процесі деформування впливу тертя і вільної роздачі металу [9, 14–17]. Радіально-пряме видавлювання порожнистої деталі з заготовки діаметром  $\varnothing 15$  мм (крива 6) дозволяє знизити силу на 41% в порівнянні з видавлюванням з заготовки діаметром  $\varnothing 28$  мм (крива 4). Тобто, збільшення площі поперечного перерізу заготовки приблизно в 2 рази призводить до

збільшення сили деформування в 1,4 рази для схеми радіально-прямого видавлювання.

Збільшення товщини стінки стакану за рахунок зменшення розмірів контрпуансона і створення більшої свободи течією матеріалу з метою зниження сил видавлювання не зробило істотного виграшу в значеннях сил деформування (крива 7).

Виготовлення порожнистих деталей згідно зі схемами 6 та 7 дозволяє знизити сили деформування в порівнянні з радіально-прямим видавлюванням (криві 4, 5) з огляду менших витрат на подолання сил контактної тертя поверхні пуансона та заготовки.

Щодо вільної формозміни заготовок при виготовленні напівфабрикатів за схемами «безматричного» видавлювання (криві 1, 2, 3) можна прийняти першим етапом виготовлення порожнистої деталі типу глибоких гільз, який дозволяє помітно знизити силу деформування в порівнянні з радіально-прямим видавлюванням заготовки  $\varnothing 28$  мм (криві 4, 5). У той же час, за цими способами важко отримати деталі необхідної форми, розмірів і якості. Але шляхом введення додаткової операції калібрування, витягці зі стоншенням або протягці на оправці цих напівфабрикатів можна отримати високоякісні деталі кінцевих розмірів зі значно меншими енерговитратами (рис. 6, а, б).

У свою чергу, зменшення діаметру заготовки і пуансона зі збільшенням радіальної течії металу (криві 6, 7) дозволяє отримати значне поліпшення силових параметрів (рис. 6, в, г).

На рис. 6 наведені фотографії деталей в розрізі, отримані відповідним способом. Матеріал заготовок – сплав АД31, які після видавлювання були протравлені для виявлення макроструктури.



Рис. 6 – Меридіональні перерізи отриманих порожнистих деталей

**Висновки.** Розглянуто і систематизовано різновиди технологічних способів видавлювання, спрямованих на зниження сил і тисків деформування при виготовленні порожнистих деталей. Для зниження енергосилових параметрів холодного деформування ефективно забезпечення більшого ступеня свободи течії металу, а також деформування з переважної радіальної течією і з роздачею. Шляхом математичного моделювання МСЕ виконано зіставлення силового режиму процесів виготовлення порожнистих деталей способами прямого з роздачею («безматричного») і комбінованого радіально-прямого видавлювання. Встановлено, що найбільші значення сил деформування відповідають способам радіально-прямого видавлювання зі збільшеним поперечним перерізом заготовки матеріалу. Методом скінченних елементів вивчені закономірності розвитку НДС заготовок при радіально-прямому видавлюванні з

роздачею. Встановлено, що матеріальні частинки заготовки, розташовані на периферійних ділянках, підлягають немонотонній деформації з додатним значенням показника напруженого стану.

Виготовлення порожнистих деталей способами «безматричного» видавлювання дозволяє знизити сили деформування в порівнянні з радіально-прямим видавлюванням заготовок, але отримана форма деталі вимагає застосування додаткових операцій калібрування, витягці зі стоншенням або протягці. Виготовлення деталей за схемами радіально-прямого видавлювання з меншим діаметром заготовок, у штампах з розвиненою радіальною течією матеріалу дозволяє отримати необхідну якість поверхні, але суттєво програє у значеннях сили видавлювання в порівнянні з «безматричним» видавлюванням для заготовок такого ж діаметру.



## Список літератури

## References (transliterated)

1. Евстратов В.А. Основы технологии выдавливания и конструирования штампов / В.А. Евстратов. – Харьков : Вища школа, 1987. – 142 с.
2. Овчинников А.Г. Основы теории холодного выдавливания на прессах / А.Г. Овчинников. – М.: Машиностроение, 1987. – 205 с.
3. Алиева Л. И. Перспективы развития процессов точной объемной штамповки выдавливанием / Л. И. Алиева, Я. Г. Жбанков // Вестник Донбасской государственной машиностроительной академии: Сб. науч. тр. – Краматорск: ДГМА, 2008. – № 1 (11). – С. 13–19.
4. Хыбемяги А.И. Совершенствование обработки формообразующих полостей прессформ и штампов // Кузнечно-штамповочное производство. – 1968. – №9. – С.17–21.
5. Евстифеев В.В., Подколзин Г.П. Методика построения геометрии инструмента при выдавливании конических стаканов // Кузнечно-штамповочное производство. – 1978. – №3. – С.11–13.
6. Даммер А.Э., Экк Е.В., Кононов В.Г. Совершенствование процесса выдавливания полых деталей на кривошипных прессах // Кузнечно-штамповочное производство. – 1977. – №2. – С.10–11.
7. Ренне И.П. Технологические возможности процесса свободного выдавливания (без матрицы) полых деталей / И.П. Ренне, А.И. Сумарокова // Кузнечно-штамповочное производство. – 1987. – №6. – С. 25–26.
8. Kalyuzhnyi. V. L. Simulation of Cold Extrusion of Hollow Parts / L. I. Alieva, D. A. Kartamyshev, I. G. Savchinskii // Metallurgist. – 2017. – Issue 5-6/2017. – P. 22–27. – Access : DOI : <https://doi.org/10.1007/s11015-017-0501-1>
9. Алиев И.С. Технологические процессы выдавливания с раздачей / И.С. Алиев, О.В. Чучин, А.А. Носаков // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: Тематич. зб. наук. пр. – Краматорськ: ДДМА, 2003. – С. 328–334.
10. Кузнецов А.В., Протопопов О.В., Блудов В.А., Коноплин А.А. Горячая штамповка стальных поковок в разъемных матрицах. – М.: НИИМАШ, 1968. – 80 с.
11. Чучин О.В., Алиева Л.И. Комбинированное последовательное радиально-прямое выдавливание полых деталей // Совершенствование процессов и оборудования обработки давлением в металлургии и машиностроении: Сб. науч. тр. – Краматорск: ДГМА, 2002. – С. 352–355.
12. Lee Y.S. The forming characteristics of radial-forward extrusion / Y.S. Lee, S.K. Hwang, Y.S. Chang, B.B. Hwang // Journal of Materials Processing Technology. – 2001. – №113. – С. 136–140.
13. Ebrahimi R. An analytical approach for radial-forward extrusion process / R. Ebrahimi, M. Reihanian, M.M. Moshksar // Materials and Design. – 2008. – № 29. – P. 1694–1700.
14. Алиева Л.И. Технологические возможности процессов радиально-прямого выдавливания с раздачей / Л.И. Алиева, О.В. Чучин // Современные проблемы горно-металлургического комплекса. Наука и производство. Материалы XII Всероссийской НПК. Том 1. Старый Оскол: СТИ НИТУ МИСиС. 2015. – С. 148–152.
15. Алиева Л. И. Способы снижения сил деформирования при холодном выдавливании / Л. И. Алиева, О. В. Чучин, П. В. Гнездилов // Вісник Херсонського національного технічного університету. – 2016. – № 1. – С. 18–25. – Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vkhdtu\\_2016\\_1\\_4](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vkhdtu_2016_1_4).
16. Алиева Л. И. Анализ процесса последовательного радиально-прямого выдавливания методом кинематических модулей / Л.И. Алиева, О. В. Чучин // Научный Вестник ДГМА. – Краматорск : ДГМА, 2015. – № 3 (18Е). – С. 5–21.
17. Алиева Л. И., Картамышев Д. А., Грудкина Н. С., Чучин О. В. Технологические процессы изготовления полых деталей на основе способов комбинированного выдавливания // Обработка материалов давлением. – 2018. – № 1 (46). – С. 22–27.
1. Evstratov V.A. Osnovy tehnologii vyidavlivaniya i konstruirovaniya shtampov / V.A. Evstratov. – KHarkov. : Vischa shkola, 1987. – 142 p.
2. Ovchinnikov A.G. Osnovy teorii holodnogo vyidavlivaniya na pressah / A.G. Ovchinnikov. – Moscow: Mashinostroenie, 1987. – 205 p.
3. Aliieva L. I. Perspektivy razvitiya protsessov tochnoy ob'emnoy shtampovki vyidavlivaniem / L. I. Aliieva, Ya. G. Zhbankov // Vestnik Donbasskoy gosudarstvennoy mashinostroitel'noy akademii: Sb. nauch. tr. – Kramatorsk: DGMA, 2008. – No 1 (11). – P. 13–19.
4. Hyibemyagi A.I. Sovershenstvovanie obrabotki formoobrazuyuschih polostey pressform i shtampov // Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo. – 1968. – No9. – P.17–21.
5. Evstifeev V.V., Podkolzin G.P. Metodika postroeniya geometrii instrumenta pri vyidavlivanii konicheskikh stakanov // Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo. – 1978. – No3. – P.11–13.
6. Dammer A.E., Ekk E.V., Kononov V.G. Sovershenstvovanie protsessa vyidavlivaniya polyih detaley na krivoshipnyih pressah // Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo. – 1977. – No2. – P.10–11.
7. Renne I.P. Tehnologicheskie vozmozhnosti protsessa svobodnogo vyidavlivaniya (bez matritsyi) polyih detaley / I.P. Renne, A.I. Sumarokova // Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo. – 1987. No6. – P. 25–26.
8. Kalyuzhnyi. V. L. Simulation of Cold Extrusion of Hollow Parts / L. I. Alieva, D. A. Kartamyshev, I. G. Savchinskii // Metallurgist. – 2017. – Issue 5-6/2017. – P. 22–27. – Access : DOI : <https://doi.org/10.1007/s11015-017-0501-1>
9. Aliiev I.S. Tehnologicheskie protsessy vyidavlivaniya s razdachey / I.S. Aliiev, O.V. Chuchin, A.A. Nosakov // Udoskonallyennyya protsesiv ta obladdannya obrabotki tiskom v metalurgiyi I mashinobuduvanni: Tematich. zb. nauk. pr. – Kramatorsk: DDMA, 2003. – P. 328–334.
10. Kuznetsov A.V., Protopyopov O.V., Bludov V.A., Konoplin A.A. Goryachaya shtampovka stalnyih pokovok v raz'Yomnyih matritsah. – Moscow: NIIMASH, 1968. – 80 p.
11. Chuchin O.V., Aliieva L.I. Kombinirovannoe posledovatelnoe radialno-pryamoye vyidavlivanie polyih detaley // Sovershenstvovanie protsessov i oborudovaniya obrabotki davleniem v metallurgii i mashinostroenii: Sb. nauch. tr. – Kramatorsk: DGMA, 2002. – P. 352–355.
12. Lee Y.S. The forming characteristics of radial-forward extrusion / Y.S. Lee, S.K. Hwang, Y.S. Chang, B.B. Hwang // Journal of Materials Processing Technology. – 2001. – No113. – P. 136–140.
13. Ebrahimi R. An analytical approach for radial-forward extrusion process / R. Ebrahimi, M. Reihanian, M.M. Moshksar // Materials and Design. – 2008. – No 29. – P. 1694–1700.
14. Aliieva L.I. Tehnologicheskie vozmozhnosti protsessov radialno-pryamoye vyidavlivaniya s razdachey / L.I. Aliieva, O.V. Chuchin // Sovremennyye problemy gorno-metallurgicheskogo kompleksa. Nauka i proizvodstvo. Materialy XII Vserossiyskoy NPK. Tom 1. Staryiy Oskol: STI NITU MISiS. 2015. – P. 148–152.
15. Aliieva L. I. Sposoby snizheniya sil deformirovaniya pri holodnom vyidavlivanii / L. I. Aliieva, O. V. Chuchin, P. V. Gnezdilov // VIsnik Hersonskogo natsionalnogo tehnichnogo unIversitetu . – 2016. – No 1. – P. 18–25. – Rezhim dostupu: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vkhdtu\\_2016\\_1\\_4](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vkhdtu_2016_1_4).
16. Aliieva L. I. Analiz protsessa posledovatel'nogo radialno-pryamoye vyidavlivaniya metodom kinematicheskikh moduley / L.I. Aliieva, O. V. Chuchin // Nauchnyy Vestnik DGMA. – Kramatorsk : DGMA, 2015. – No 3 (18E). – P. 5–21.
17. Aliieva L. I., Kartamyshev D. A., Grudkina N. S., Chuchin O. V. Tehnologicheskie protsessy izgotovleniya polyih detaley na osnove sposobov kombinirovannogo vyidavlivaniya // Obrabotka materialov davleniem. – 2018. – No 1 (46). – P. 22–27.

Поступила (received) 05.10.2018

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

**Алієва Лейла Іграмотдіновна (Алиева Лейла Играмотдиновна, Aliieva Leila Igramotdinovna)** – доктор технічних наук, доцент, Донбаська державна машинобудівна академія (ДДМА), e-mail: [pnir@dgma.donetsk.ua](mailto:pnir@dgma.donetsk.ua)

**Картамішев Дмитро Олександрович (Kartamyshev Дмитрий Александрович, Kartamyshev Dmytro Olexandrovich)** – аспірант, Донбаська державна машинобудівна академія (ДДМА); e-mail: [omd@dgma.donetsk.ua](mailto:omd@dgma.donetsk.ua)

**Махмудов Казбек Джайрулаєвич (Махмудов Казбек Джайрулаєвич, Mahmudov Kazbek Djarulaevich)** – кандидат технічних наук, професор, Дагестанський державний технічний університет

**Чучин Олег Володимирович (Чучин Олег Владимирович, Chuchin Oleg Volodimirovich)** – кандидат технічних наук, доцент, Донбаська державна машинобудівна академія (ДДМА), e-mail: [pnir@dgma.donetsk.ua](mailto:pnir@dgma.donetsk.ua)

УДК 621.7.043

*Р. Г. АРГАТ, Р. Г. ПУЗИР, Р. А. ВАКУЛЕНКО***ВПЛИВ АНІЗОТРОПІЇ І ЗМІЦНЕННЯ МЕТАЛУ НА ВТРАТУ СТІЙКОСТІ ФЛАНЦЯ ПРИ ВИТЯГУВАННІ ЦИЛІНДРИЧНОЇ ДЕТАЛІ БЕЗ СКЛАДКОУТРИМУВАЧА**

Пропонується теоретична залежність для розрахунку граничної товщини заготовки з урахуванням зміцнення і анізотропії вихідного металу при витяжці циліндричної деталі без притиску фланця. Плоска анізотропія в порівнянні з витягуванням ізотропного матеріалу додатково навантажує одні ділянки внутрішнього контуру фланця заготовки і розвантажує інші, в цілому погіршуючи умови витяжки, що призводить до утворення гофрів і фестонів на торці заготовки. Врахування зміцнення і анізотропії заготовки при розрахунку поля напружень і деформацій, а також при визначенні інтервалів безпритискового штампування пов'язане з більшим наближенням до фізичної сутності деформування листового металу і отриманням більш точних теоретичних моделей. Результати розрахунків по отриманій залежності збігаються з раніше відомими даними, достовірно відображають вплив коефіцієнта витягування, плоскої анізотропії і початкового діаметра заготовки на критичну товщину пластини. Діаметр заготовки найбільше впливає на втрату стійкості, з його збільшенням зростає коефіцієнт витягування і відповідно товщина пластини. Отримана залежність розкриває повніше вплив діаметра заготовки на результати і якщо коефіцієнт витяжки залишити незмінним при збільшенні початкових розмірів заготовки, то товщина пластини також збільшиться, так як в формулу для розрахунку радіус заготовки входить в другому ступені. Це положення узгоджується з поняттям відносної товщини заготовки. Формула придатна для використання при проектуванні технологічних процесів холодного штампування, при цьому необхідною умовою є визначення механічних характеристик металу і його параметрів анізотропії безпосередніми випробуваннями на підприємстві. Так як метал навіть однієї партії може мати значні розбіжності за своїми механічними показниками. Це дозволить на етапі вибору способу витяжки уникнути додаткових пробних операцій і скоротить час підготовки виробництва і призведе до економії металу. Відмінною особливістю даної залежності є врахування практично всіх факторів технологічного процесу витяжки, а також основного множника, який враховує розподіл напружень при формоутворенні.

**Ключові слова:** плоска анізотропія, гранична товщина, відносна товщина, коефіцієнт витяжки, поле напружень, деформація.

*Р. Г. АРГАТ, Р. Г. ПУЗИРЬ, Р. А. ВАКУЛЕНКО***ВЛИЯНИЕ АНИЗОТРОПИИ И УПРОЧНЕНИЯ МЕТАЛЛА НА ПОТЕРЮ УСТОЙЧИВОСТИ ФЛАНЦА ПРИ ВЫТЯЖКЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ БЕЗ СКЛАДКОДЕРЖАТЕЛЯ**

Предлагается теоретическая зависимость для расчета предельной толщины заготовки с учетом упрочнения и анизотропии исходного металла при вытяжке цилиндрической детали без прижима фланца. Плоская анизотропия по сравнению с вытягиванием изотропного материала дополнительно нагружает одни участки внутреннего контура фланца заготовки и разгружает другие, в целом ухудшая условия вытяжки, приводит к образованию гофр и фестонов на торце заготовки. Учет упрочнения и анизотропии заготовки при расчете поля напряжений и деформаций, а также при определении интервалов безприжимной штамповки связан с большим приближением к физической сущности деформирования листового металла и получением более точных теоретических моделей. Результаты расчетов по полученной зависимости совпадают с ранее известными данными, достоверно отражают влияние коэффициента вытяжки, плоской анизотропии и начального диаметра заготовки на критическую толщину пластины. Диаметр заготовки более всего влияет на потерю устойчивости, с его увеличением возрастает коэффициент вытяжки и соответственно толщина пластины. Полученная зависимость раскрывает полнее влияние диаметра заготовки на результаты и если коэффициент вытяжки оставить неизменным при увеличении начальных размеров заготовки, то толщина пластины также увеличится, так как в формулу для расчета радиус заготовки входит во второй степени. Это положение согласуется с понятием относительной толщины заготовки. Формула пригодна для использования при проектировании технологических процессов холодной штамповки, при этом необходимым условием является определение механических характеристик металла и его параметров анизотропии непосредственными испытаниями на предприятии. Так металл даже одной партии может иметь значительные расхождения по своим механическим показателям. Это позволит на этапе выбора способа вытяжки избежать дополнительных пробных операций и сократит время подготовки производства и приведет к экономии металла. Отличительной особенностью данной зависимости является учет практически всех факторов технологического процесса вытяжки, а также основного множителя, который учитывает распределение напряжений при формообразовании.

**Ключевые слова:** плоская анизотропия, граничная толщина, относительная толщина, коэффициент вытяжки, поле напряжений, деформация.

*R. G. ARHAT, R. G. PUZYR, R. A. VAKULENKO***INFLUENCE OF ANISOTROPY AND STRENGTHENING OF METAL ON THE LOSS STABILITY OF THE FLANGE WHEN DRAWING CYLINDRICAL DETAILS WITHOUT THE FOLDER**

A theoretical relationship is proposed for calculating the maximum thickness of the workpiece, taking into account the hardening and anisotropy of the original metal when drawing a cylindrical part without pressing the flange. Compared to pulling an isotropic material, flat anisotropy additionally loads some areas of the internal contour of the blank flange and unloads others, generally worsening the drawing conditions, leading to the formation of corrugations and festoons at the end of the blank. Accounting for the hardening and anisotropy of the workpiece in the calculation of the stress and strain fields, as well as in the determination of pressureless stamping intervals is associated with a large approximation to the physical nature of sheet metal deformation and the production of more accurate theoretical models. The results of calculations based on the obtained dependences coincide with previously known data, reliably reflect the influence of the drawing ratio, flat anisotropy and the initial diameter of the workpiece on the critical thickness of the plate. The diameter of the workpiece most of all affects the loss of stability, with its increase the drawing ratio increases and, accordingly, the thickness of the plate. The dependence obtained more fully reveals the effect of the diameter of the workpiece on the results and if the drawing ratio is left unchanged with an increase in the initial dimensions of the workpiece, the plate thickness will also increase, since the radius of the workpiece enters the second degree in the formula for calculating. This position is consistent with the concept of the relative thickness of the workpiece. The formula is suitable for use in the design of technological processes of cold forming, while the necessary condition is the determination of the mechanical characteristics of the metal and its anisotropy parameters by direct testing at the enterprise. So even a single metal batch can have significant differences in their mechanical performance. This will allow to avoid additional trial operations at the stage of selection of the method of drawing and will reduce the time of pre-production and lead to metal savings. A distinctive feature of this relationship is the consideration of almost all factors of the technological process of drawing, as well as the main factor, which takes into account the distribution of stresses during shaping.

**Keywords:** flat anisotropy, boundary thickness, relative thickness, drawing ratio, stress field, deformation.

© Р. Г. Аргат, Р. Г. Пузир, Р. А. Вакуленко, 2018

**Вступ.** Деформування металів і сплавів в холодному стані призводить до різних ефектів пластичної деформації [1, 2], а також до необхідності врахування впливу зміцнення і початкової анізотропії металу на кінцевий і проміжні результати стану формоутворення [3–5].

Плоска анізотропія в порівнянні з витяжкою ізотропного матеріалу додатково навантажує одні ділянки внутрішнього контуру фланця заготовки і розвантажує інші, в цілому погіршуючи умови витяжки [6]. Це призводить до утворення гофрів і фестонів на торці заготовки. Тому необхідність врахування зміцнення і анізотропії заготовки при розрахунку поля напружень і деформацій, а також при визначенні інтервалів безприжимного штампування, пов'язана з суттєвим наближенням до фізичної сутності деформування листового металу і отриманням більш точних теоретичних моделей.

Стійкість пластичного формоутворення листового металу – одна з основних умов отримання штампованих виробів високої якості. Втрата стійкості формоутворення характеризується виникненням великих місцевих деформацій, які зазвичай призводять або до руйнування металу, або до утворення неприпустимо великих спотворень форми виробу. Підвищення стійкості формотворчих операцій листового штампування забезпечує зниження браку і значну економію металу, сприяє збільшенню надійності роботи автоматичних і потокових ліній штампування, покращує якість продукції [7, 9].

Хвилястість, що є наслідком втрати стійкості за схемою Ейлера, утворюється на стиснутих і стиснуто-розтягнутих ділянках листової заготовки і призводить до спотворення форми виробу.

Велика частина опублікованих робіт за цим типом втрати стійкості відноситься до дослідження утворення хвилястості на плоскому фланці при витяжці деталей, що мають форму тіл обертання. У цих роботах рішення задачі про стійкість фланця дано за аналогією з рішенням задачі про пружно-пластичному випинанні стисненого стрижня методом Енгессера-Кармана, тобто приймалося, що формули для пружного випинання пластин і оболонок справедливі і при їх випинанні за межею пружності, якщо модуль пружності замінити наведеним модулем. Однак розрахунок на стійкість стиснутих ділянок листової заготовки при її формоутворенні є типовим завданням теорії пластичності [7, 10].

Точне рішення задачі про напружений стан фланця листової анізотропної заготовки при глибокій витяжці пов'язано з великими математичними труднощами. Тому для її вирішення з метою визначення параметрів інструменту і заготовки, а також технологічних факторів, які усувають хвилястість або ж максимально її зменшують, були прийняті припущення та гіпотези листового штампування, а також приймалося наступне: нехтували зміною товщини фланця, тобто вважали, що фланець знаходиться в умовах плоскої деформації; пластична ортотропія листового металу; придбана в процесі пластичної деформації анізотропія мала і не

робить істотного впливу на його початкову анізотропію; ефект Баушінгера відсутній; метал заготовки підпорядковується законам пружно-пластичного зміцненого середовища в зоні виникнення гофрів; сили зростають повільно і швидкості деформацій невеликі; процес пластичного формоутворення вважаємо рівноважним процесом деформації, що складається із сукупності наступних одне за іншим рівноважних пластичних станів, кожне з яких відповідає певній стадії навантаження. Але для пошуку точних рішень, щодо визначення граничної товщини заготовки для витяжки без притиску необхідно було враховувати, як зміцнення металу, так і його анізотропію механічних властивостей [11, 13].

**Мета роботи.** Формування теоретичних залежностей для розрахунку граничної товщини заготовки з урахуванням зміцнення і анізотропії вихідного металу при витяжці циліндричної деталі без притиску фланця.

**Виклад основного матеріалу.** Розвитком теорії витяжки анізотропного металу займалися такі дослідники як С. П. Яковлев, В. В. Шевельов, В. Д. Кухар, В. Д. Головлев, Ю. М. Аришенський, Д. Н. Цой, Ф. І. Рузанов і ін. Для знайдення рішень використовували теорію пластичності анізотропного тіла Р. Хілла. Так, наприклад, в роботі Головльова В. Д. [7], наводяться залежності для розрахунку критичної товщини анізотропної заготовки, для якої ще гофроутворення не спостерігається

$$s_k = \frac{3}{\pi} b \sqrt{2\mu |\sigma_u| \frac{L_k}{E_p}}, \quad (1)$$

де  $b$  – ширина фланця;

$\mu$  – коефіцієнт, який залежить від анізотропії;

$\sigma_u$  – головні нормальні тангенціальні напруження, що діють за напрямом осі анізотропії;

$$\begin{aligned} L_k &= \frac{N}{M}; \\ M &= B_1 \frac{b^2}{a^2} + B_2 \frac{a^2}{b^2} + B_3; \\ N &= F_1 + F_2 \frac{a^2}{b^2}; \\ B_1 &= \frac{3}{2} \left( \frac{3}{2} - \frac{4}{\pi} \right) \left( \frac{c_{22}}{g} - \frac{4\psi}{3K_\sigma} \right); \\ B_2 &= \frac{3}{64} \left( \frac{c_{11}}{g} - \frac{\psi}{K_\sigma} m_\sigma^2 \right); \\ B_3 &= \frac{3}{4c_{33}} + \frac{3}{2} \left( \frac{1}{\pi} - \frac{1}{4} \right) \left( \frac{c_{12}}{g} + \frac{4\psi}{3K_\sigma} m_\sigma \right); \\ F_1 &= \left( \frac{3}{2} - \frac{4}{\pi} \right) \beta; \\ F_2 &= \frac{1}{8} m_\sigma; \end{aligned}$$

$$\psi = \frac{3}{4}(1-n);$$

$$g = c_{11}c_{22} - c_{12}^2;$$

$$K_\sigma = c_{11} + 2c_{12}m_\sigma + c_{22}m_\sigma^2;$$

$$m_\sigma = \frac{\sigma_v}{\sigma_u} - \text{відношення головних нормальних}$$

напружень в осях анізотропії;

$E_p$  – модуль пластичності анізотропного матеріалу;

$n$  – постійна величина (показник зміцнення), що характеризує здатність металу до зміцнення;

$a$  – довжина півхвилі;

$\beta$  – коефіцієнт, вибирається у межах  $\frac{1}{2} \div \frac{1}{3}$ ;

$c_{11}, c_{12}, c_{22}$  – константи анізотропії.

В роботі Яковлева С. С. [8] наведені дані, засновані на схожому підході з попереднім дослідженням, для відносної критичної товщини пластини, що забезпечує витяжку без гофроутворення з урахуванням анізотропії: для сталі 08кп –  $s_k = 0,0247 \pm 0,0003$ , для латуні –  $s_k = 0,0299 \pm 0,0004$ .

Раніше [10, 15] були виведені залежності для теоретичного розрахунку товщини заготовки, що забезпечує витяжку без притиску фланця. Результати розрахунків по ним дають деякі розбіжності з емпіричними формулами Шофмана Л. І. [11]. Товщина пластини виявляється дещо завищеною. Тому необхідно доопрацювати теоретичний результат шляхом врахування зміцнення і анізотропії вихідного металу.

Уточнення отриманих залежностей будемо вести відповідно до припущень, представлених в [7], які узгоджуються з теорією пластичності анізотропного тіла Р. Хілла: пластична ортотропія листового металу; придбана в процесі пластичного деформування анізотропія листового металу незначна і не робить істотного впливу на його початкову анізотропію; матеріал заготовки стискаємо; зміцнення металу ізотропне; ефект Баушінгера відсутній. Вираз для січення модуля анізотропного металу заготовки матиме вигляд [7]

$$E_{ca} = \mu c_{11} E_c, \quad (2)$$

Для матеріалу з круговою симетрією при

$$R_x = R_y = R_0; R_{xy} = \frac{R_0}{1+2R_0}; c_{11} = c_{22}; \Delta = 0; c_{13} = c_{23} = 0$$

з (2) будемо мати

$$E_{ca} = \frac{3}{2} \cdot \frac{1+R_0}{2+R_0} E_c. \quad (3)$$

Враховуючи анізотропію, знайдемо напруження в осередку деформації за аналогією з [9, 12]

$$\sigma_r = \frac{1}{\sqrt{\mu\psi}} \sigma_{ec} \ln \frac{r_n}{r}, \quad (4)$$

де

$$\psi = \frac{(c_{11} + c_{12})(c_{22} + c_{12})}{c_{11} + 2c_{12} + c_{22}} - c_{12}, \quad \mu = \frac{3}{2 \left( 1 + \frac{1}{R_x} + \frac{1}{R_y} \right)}.$$

Тоді співвідношення до критичної товщини пластини матиме вигляд

$$h^2 = 0,041 \frac{2}{3} \frac{r_n^2}{E_c} \frac{2+R_0}{1+R_0} \frac{1}{\sqrt{\mu\psi}} \sigma_{ec} \ln \frac{r_n}{r}. \quad (5)$$

Уявімо показник пластичності  $E_c$  і усереднену інтенсивність напружень з урахуванням зміцнення у вигляді [13, 14]

$$E_c = C \varepsilon_i^{n-1}, \quad (6)$$

$$\sigma_{ec} = C \varepsilon_i^n, \quad (7)$$

де  $C$  і  $n$  – константи матеріалу, визначені дослідом на розтягнення зразків.

Підставивши дані формули в (5) і провів нескладні перетворення з урахуванням  $\varepsilon_i = 0,5\varepsilon_\theta$ , отримаємо

$$h^2 = 0,041 \frac{r_n^2}{3} \frac{2+R_0}{1+R_0} \left( 1 - \frac{r}{r_n} \right) \frac{1}{\sqrt{\mu\psi}} \ln \frac{r_n}{r}. \quad (8)$$

Виразимо коефіцієнти анізотропії  $\mu, \psi$  через їх параметри, підставив один з коренів Беселевої функції і остаточно будемо мати

$$h^2 = 0,0045 r_n^2 \frac{2+R_0}{1+R_0} \left( 1 - \frac{r}{r_n} \right) \sqrt{\frac{2(1+R_0)}{1+2R_0}} \ln \frac{r_n}{r}. \quad (9)$$

**Обговорення результатів.** Зробимо розрахунок для наступних параметрів деформування:  $d = 25$  мм,  $D = 40$  мм,  $R_0 = 1$ . Матимемо

$$h^2 \geq 0,0045 \cdot 20^2 \frac{3}{2} \left( 1 - \frac{12,5}{20} \right) \sqrt{\frac{4}{3}} \ln \frac{20}{12,5} \geq 0,545$$

$$\text{і } h \geq 0,738 \text{ мм.}$$

Порівняння результатів, отриманих із залежностей [9, 10, 13–15] і (9) з умовою втрати стійкості показує, що врахування анізотропії металу заготовки дозволяє більш точно відшукати критичну товщину вихідного металу. Розбіжність становить не більше 8,5 % (рис. 1). З рис. 1 видно, що результати розрахунків практично збігаються, але зі збільшенням початкового діаметру заготовки і відповідно ступеню деформації зростання товщини збільшується для формули (9) ніж для емпіричного рівняння Л.І. Шофмана. Це свідчить про те, що аналітичне рішення (9) адекватно описує залежність товщини заготовки від її розмірів в плані.

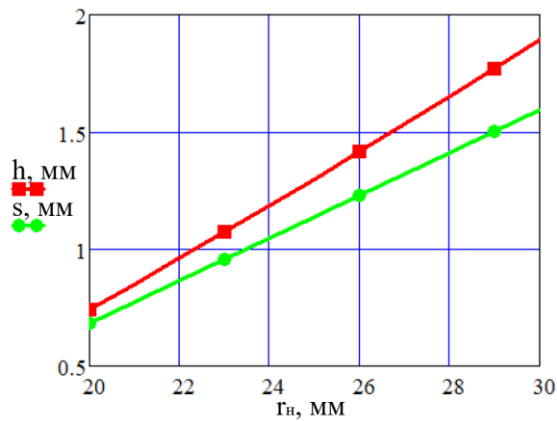


Рис. 1. Зміна товщини заготовки від її початкового радіусу:  $h$  – товщина заготовки, розрахована за залежністю (9);  $s$  – товщина заготовки, розрахована за формулою Шофмана Л.І.;  $r_n$  – початковий радіус заготовки

Аналізуючи формулу (9), можна зробити висновок, що збільшення показника анізотропії від 0,5 до 2 зменшує критичну товщину заготовки. Фланець напівфабрикату з матеріалу з великим показником  $R_0$  буде більш стійкий при деформації. Це збігається з висновками Головлєва В. Д. і Жаркова В. А., де показано, що з ростом показників анізотропії опірність деформації фланця зменшується і гранична ступінь витяжки збільшується. Однак, плоска анізотропія загалом негативно позначається на процесі деформації і погіршує умови формоутворення. При цьому товщина заготовки повинна бути збільшена в 1,6–2 рази в порівнянні з деформацією ізотропного металу (рис. 2).

Інтерес представляє також порівняння результатів з формулою Головлєва В. Д. (1) і експериментальними даними Яковлєва С. С., які наведені вище. Розрахунок проводимо для умов:  $d = 45$  мм,  $D = 90$  мм. Для сталі 08кп  $R_0 = 1,706$  [8]. Знаходимо відносну критичну товщину пластини  $\bar{h} = s/D$ .

$$h^2 \geq 0,0045 \cdot 45^2 \frac{2+1,706}{1+1,706} \left(1 - \frac{22,5}{45}\right) \cdot \sqrt{\frac{2(1+1,706)}{1+2 \cdot 1,706}} \ln \frac{45}{22,5} \geq 4,785,$$

$$h \geq 2,19 \text{ мм} \quad i \quad \bar{h} = 2,19/90 = 0,0243.$$

За формулою Головлєва В. Д.  $\bar{h} = 0,0237$ , за експериментальними даними Яковлєва С. С.  $\bar{h} = 0,0247$ , за емпіричною формулою Шофмана Л. І.  $D - d \leq (18 \div 22)s$   $\bar{h} = 0,0227$ . Найбільша розбіжність результатів з формулою Шофмана Л. І. складає трохи більше 6 %.

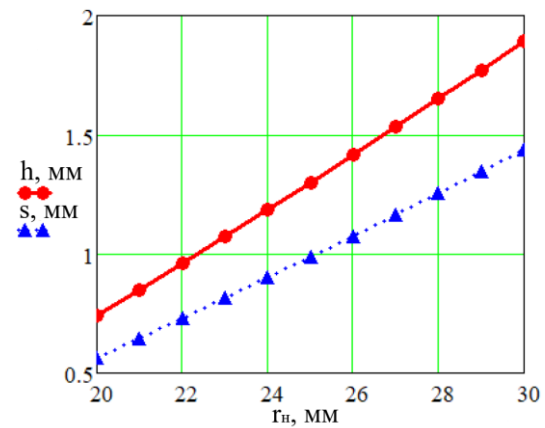


Рис. 2. Зміна товщини заготовки в залежності від збільшення її початкового радіусу:  $h$  – товщина заготовки, розрахована за залежністю (9) з урахуванням анізотропії і зміцнення металу в процесі деформації;  $s$  – товщина заготовки, розрахована за формулою [10], без врахування вищезгаданих параметрів;  $r_n$  – початковий радіус заготовки

**Висновки.** Тому можна зробити висновок про те, що результати розрахунків по залежності (9) збігаються з раніше відомими даними, достовірно відображають вплив коефіцієнта витяжки, плоскої анізотропії і початкового діаметра заготовки на критичну товщину пластини. При цьому на втрату стійкості найбільше впливає діаметр заготовки. З його збільшенням зростає коефіцієнт витяжки і відповідно товщина пластини. Однак залежність (9) більш повно розкриває вплив діаметра заготовки на результати. Якщо коефіцієнт витяжки залишити незмінним при збільшенні початкових розмірів заготовки, то товщина пластини також збільшиться, так як в формулу для розрахунку радіус заготовки входить в другому ступені. Це положення узгоджується з поняттям відносної товщини  $s/D$  за Романовським В. П. [12]. Для того, щоб виконувалася нерівність  $100s/D \leq 4,5(1 - m_1)$  при збільшенні діаметра заготовки, але при незмінному коефіцієнті витяжки – необхідно збільшити товщину матеріалу.

#### Список літератури

1. Чигиринский В. В. *Современное производство колес автотранспортных средств и сельскохозяйственной техники: [Монография]*. В. В. Чигиринский, В. Л. Мазур, С. В. Беликов и др. Днепропетровск: РИА «Днепр-VAL», 2010. 309 с.
2. Борисевич В. К., Загирняк М. В., Драгобецкий В. В. Выбор оптимальных параметров вытяжки листовых заготовок. *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*. 2009. № 2. С. 38–41.
3. Каложный В. Л., Запороженко А. С., Піманов В. В. Интенсификация технологий изготовления вилки «Балон 180×184». *Обработка материалов давлением: сборник научных трудов*. Краматорск: ДГМА, 2012. № 2 (31). С. 136–140.
4. Огородников В. А. *Деформируемость и разрушение металлов при пластическом деформировании*. Киев: УМК ВО, 1989. 150 с.
5. Мосьпан Д. В., Драгобецкий В. В., Пузырь Р. Г. Определение потребного крутящего момента при радиально-ротационном профилировании ободьев колес. *Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського*. Кременчук: КДПУ, 2008. Вип. 6 (53), частина 2. С. 64–66.

6. Жарков В. А. Методика разработки технологических процессов вытяжки с учетом анизотропии листовых материалов. *Кузнечноштамповочное производство*. 1991. № 9. С. 12–15.
7. Головлев В. Д. *Расчеты процессов листовой штамповки*. М: Машиностроение, 1974. 136 с.
8. Яковлев С. С., Ремнев К. С. Складкообразование при вытяжке осесимметричных деталей из анизотропного материала. *Изв. вузов. Машиностроение*. 2014. № 9 (654). С. 39–47.
9. Пузырь Р. Г., Троцко О. В., Черкашенко В. Ю. Влияние геометрических параметров цилиндрической заготовки на напряженно-деформированное состояние при раздате коническими пуансонами. *Обработка материалов давлением: сборник научных трудов*. Краматорск: ДГМА, 2012. № 4 (33). С. 114–121.
10. Аргат Р. Г., Пузырь Р. Г. Определение геометрических параметров листовой заготовки для вытяжки осесимметричных деталей, устраняющих потерю устойчивости фланца. *Обработка материалов давлением: сборник научных трудов*. Краматорск: ДГМА, 2013. № 2 (35). С. 118–123.
11. Шофман Л. А. *Теория и расчеты процессов холодной штамповки*. М.: Машиностроение, 1964. 375 с.
12. Романовский В. П. *Справочник по холодной штамповке*. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1979. 520 с.
13. Puzyr R., Savelov D., Argat R., Chernish A. Distribution analysis of stresses across the stretching edge of die body and bending radius of deforming roll during profiling and drawing of cylindrical workpiece. *Metallurgical and Mining Industry*. 2015. № 1. P. 27–32.
14. Puzyr R., Haikova T., Trotsko O., Argat R. Determining experimentally the stress-strained state in the radial rotary method of obtaining wheels rims. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Engineering technological systems*. VOL. 4. № 1 (82). 2016. P. 52–60.
15. Аргат Р. Г., Пузырь Р. Г., Долгих О. Н. Оценка приемов, увеличивающих степень деформации при вытяжке цилиндрических деталей без складкодержателя. *Вісник Нац. ун-ту «ХПІ»: зб. наук. пр. Сер.: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії*. Харків: НТУ «ХПІ», 2017. № 36 (1258). С. 5–9.
5. Mos'pan D. V., Dragobekij V. V., Puzyr R. G. Opredelenie potrebnogo krutjashhego momenta pri radial'no-rotacionnom profilirovanii obod'ev koles [Determination of the required torque at radial-rotational profiling of wheel rims]. *Visnik Kremenchuc'kogo derzhavnogo politehnichnogo universitetu imeni Mihajla Ostrograds'kogo* [Bulletin of the Kremenchug State Polytechnic University named after Mikhail Ostrogradsky]. Kremenchuk: KDPU, No 6.53, 2008, part 2, pp. 64–66.
6. Zharkov V. A. Technique of the development of technological processes of extraction, taking into account the anisotropy of sheet materials. *Forging production*. 1991, No 9, pp. 12–15.
7. Golovlev V. D. *Calculations of the processes of sheet punching (Stability of the formation of sheet metal)* Moscow: Mechanical engineering, 1974, 136 p.
8. Yakovlev S. S., Remnev K. C. Wrinkling of axisymmetric parts made by drawing of an anisotropic material. *Proceedings of higher educational institutions: Mechanical engineering*, 2014, No 9 (654), pp. 39–47.
9. Puzyr R. G., Trotsko O. V., Cherkashchenko V. Y. Vliyanie geometricheskikh parametrov tsilindricheskoy zagotovki na napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie pri razdache konicheskimi puansonami [Influence of geometrical parameters of cylindrical preparation on the intense deformed state at distribution by conic punches]. *Processing of materials pressure: collection of scientific works*. Kramatorsk: DGMA, 2012, No 4 (33), pp. 114–121.
10. Arhat R. G., Puzyr R. G. Opredeleniye geometricheskikh parametrov listovoy zagotovki dlya vytyazhki osesimmetrichnykh detaley, ustranyayushchikh poteryu ustoychivosti flantsa [Determination of the geometrical parameters of the sheet blank for drawing axisymmetric parts that eliminate the loss of stability of the flange]. *Processing of materials pressure: collection of scientific works*. Kramatorsk: DGMA, 2013, No 2 (35), pp. 118–123.
11. Shofman L. A. *Teoriya i raschety protsessov kholodnoy shtampovki* [Theory and calculations of processes of the cold stamping]. Moscow: Engineer, 1964, 375 p.
12. Romanovsky V. P. *Spravochnik po kholodnoy shtampovke* [Cold stamping guide]. Leningrad: Mechanical engineering, 1979, 520 p.
13. Puzyr R., Savelov D., Argat R., Chernish A. Distribution analysis of stresses across the stretching edge of die body and bending radius of deforming roll during profiling and drawing of cylindrical workpiece. *Metallurgical and Mining Industry*, 2015, No 1, pp. 27–32.
14. Puzyr R., Haikova T., Trotsko O., Argat R. Determining experimentally the stress-strained state in the radial rotary method of obtaining wheels rims. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Engineering technological systems*. Vol. 4. No 1 (82), 2016, pp. 52–60.
15. Arhat R. G., Puzyr R. G., Dolgih O. N. Evaluation of techniques that increase the degree of deformation in the extraction of cylindrical parts without a storage holder. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Innovative technologies and equipment of materials processing in engineering and metallurgy*. Kharkiv, NTU "KhPI", 2017, No 36(1258), pp. 5–9.

## References (transliterated)

1. Chigirinskij V. V., Mazur V. L., Belikov S. B., Kolesnik F. I., Legotcin G. I., Slepynin A. G., Shevchenko T. G. *Sovremennoe proizvodstvo koles avtotransportnykh sredstv i sel'skohozjajstvennoj tehniki* [Modern production of wheels of motor vehicles and agricultural machinery]. Dnepropetrovsk, RIA «Dnepr-VAL», 2010, 309 p.
2. Boresevich V. K., Zagerniak M. V., Dragobetskiy V. V. *Choice of optimum parameters extend of sheet preparations*. Forge-stamp manufacture. 2009, No 2, pp. 38–41.
3. Kalyughniyi V. L., Zaporozhenko A. P., Pimanov V. V. Intensification of technologies of making of good is «Bulb 180x184» *Treatment of materials pressure: collection of scientific labour*. Kramatorsk: DSMA, 2012, No 2 (31), pp. 136–140.
4. Ogorodnikov V. A. *Deformiruyemost' i razrusheniye metallov pri plasticheskom deformirovanii* [Deformability and destruction of metals during plastic deformation]. Kiev: UMK VO, 1989, 150 p.

Hadiiusha (received) 01.11.2018

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

**Аргат Роман Григорович (Аргат Роман Григорьевич, Arhat Roman)** – Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, старший викладач кафедри технологія машинобудування; м. Кременчук, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9247-5297>; e-mail: [argat.rg@gmail.com](mailto:argat.rg@gmail.com).

**Пузырь Руслан Григорович (Пузырь Руслан Григорьевич, Puzyr Ruslan)** – доктор технічних наук, доцент, Коледж Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського, доцент відділення машинобудування; м. Кременчук, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9791-9002>; e-mail: [puzyruslan@gmail.com](mailto:puzyruslan@gmail.com).

**Вакуленко Роман Андрійович (Вакуленко Роман Андреевич, Vakulenko Roman)** – Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, кандидат технічних наук, доцент кафедри галузевого машинобудування; м. Кременчук, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8845-962X>; e-mail: [rom.vak311@gmail.com](mailto:rom.vak311@gmail.com)

УДК 378.14

*Ю. Н. БАРДАЧЁВ, Ю. Г. РОЗОВ***СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНЖЕНЕРНОГО ОБРАЗОВАНИЯ В УКРАИНЕ И ВОЗМОЖНЫЕ ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ НА ПРИМЕРЕ ХЕРСОНСКОГО НАЦИОНАЛЬНОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА**

На основании изучения и анализа современного состояния и тенденций развития инженерного образования в Украине и в мире, определена необходимость и предложены направления выхода из кризиса высшей технической школы Украины на государственном уровне, а также основные направления инновационных преобразований на примере организации образовательного процесса в Херсонском национальном техническом университете. Предложенные инновации предусматривают реформирования учебного процесса с использованием современных образовательных технологий, средств, методов и моделей обучения, и основываются на новом уровне организации процесса и взаимоотношений его участников на всех стадиях обучения и контроля знаний, умений и навыков, с учетом запросов со стороны работодателей, как конечных потребителей образовательных услуг.

**Ключевые слова:** инженерное образование, образовательные услуги, инновационные изменения, демократизация учебного процесса, кооперативное обучение, проблемное обучение, автономия студентов, информатизация, контроль знаний.

*Ю. М. БАРДАЧОВ, Ю. Г. РОЗОВ***СУЧАСНІ ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ ІНЖЕНЕРНОЇ ОСВІТИ В УКРАЇНІ НА ПРИКЛАДІ ХЕРСОНСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ**

На підставі вивчення та аналізу сучасного стану та тенденцій розвитку інженерної освіти в Україні і в світі, визначено необхідність і запропоновано напрями виходу з кризи вищої технічної школи України на державному рівні, а також основні напрями інноваційних перетворень на прикладі організації освітнього процесу в Херсонському національному технічному університеті. Запропоновані інновації передбачають реформування навчального процесу з використанням сучасних освітніх технологій, засобів, методів і моделей навчання, і ґрунтуються на новому рівні організації процесу та взаємовідносин його учасників на всіх стадіях навчання і контролю знань, умінь і навичок, з урахуванням запитів з боку роботодавців, як кінцевих споживачів освітніх послуг.

**Ключові слова:** інженерна освіта, освітні послуги, інноваційні зміни, демократизація навчального процесу, кооперативне навчання, проблемне навчання, автономія студентів, інформатизація, контроль знань.

*YU. N. BARDACHEV, YU. G. ROZOV***MODERN TENDENCIES OF DEVELOPMENT OF ENGINEERING EDUCATION IN UKRAINE ON THE EXAMPLE OF KHERSON NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY**

Global changes in the socio-political system and the economic sector of the country have had a significant impact on the activities of technical higher education institutions at present. In addition, traditional educational technologies can no longer provide the necessary level of engineering training of specialists, taking into account the dynamic development of the modern economy. Based on the study and analysis of the current state and trends in the development of engineering education in Ukraine and in the world, the necessity and directions for the exit from the crisis of the higher technical school of Ukraine at the state level have been determined, as well as the main directions of innovative transformations based on the organization of the educational process at the Kherson National Technical University, Implementation of which, according to the authors, will provide an opportunity to train future specialists at the level of world standards and requirements. The proposed innovations envisage reforming the educational process using modern educational technologies, means, methods and models of training, and are based on a new level of organization of the process and the relationships of its participants at all stages of training and monitoring knowledge, skills and abilities, taking into account the requests from employers, as final consumers of educational services.

**Keywords:** engineering education, educational services, innovative changes, democratization of the educational process, cooperative learning, problem training, student autonomy, informatization, knowledge control.

**Введение.** В данной статье представлено видение, а точнее – пожелание возможного развития инженерного образования в Украине, в том числе, на примере Херсонского национального технического университета (ХНТУ) в современных условиях в ближайшее время, которые основаны на изучении и анализе тенденций развития современного образования [1-5].

Анализируя нынешнее состояние инженерного образования, как важнейшей составляющей отечественного высшего образования, авторы рассматривают существующие проблемы, причины их возникновения и предлагают пути их решения, как на государственном уровне, так и на уровне ВУЗа.

**Цель статьи** – разработать основные направления выхода из кризиса высшей технической школы Украины, а также пути инновационного развития инженерного образования, внедрение

которых позволит вывести учебный процесс на уровень мировых стандартов и требований.

Высшая техническая школа Украины всегда отличалась качеством подготовки и была гордостью отечественного образования. При этом объектом заслуженной гордости были все аспекты инженерного образовательного процесса: организация учебных занятий, научные и учебные лаборатории, методы преподавания и др. И главное – кадры. Выдающийся украинский учёный в области прикладной механики, профессор Киевского политехнического института Степан Прокофьевич Тимошенко в своих воспоминаниях [6], анализируя состояние инженерного образования в то время, с гордостью пишет, что «престиж профессора в инженерных учебных заведениях очень высок...». И далее: «... их количество не зависит от числа студентов. А количество доцентов и преподавателей пропорционально числу студентов... Месячная



профессорская зарплата примерно в 10 раз больше, чем зарплата неквалифицированного рабочего. Работа профессора ограничена 15 часами в неделю и включает в себя не только лекционные часы, но также и время, отводимое на консультации для студентов, экзаменационную работу и другую деятельность». И ещё о престиже инженерной профессии: «Профессия инженера ценится очень высоко, и число молодых людей, желающих её получить, в несколько раз больше числа вакансий».

Так было.

Но глобальные изменения в социально-политическом устройстве и экономическом секторе страны, оказали значительное влияние на деятельность технических высших учебных заведений.

Во-первых – это современное состояние промышленности, в том числе в регионах.

В настоящее время региональная экономика претерпела значительные изменения. И это – нормально. Мир стремительно меняется и, конечно, должна меняться и региональная промышленность, её структура и наполнение. Но – меняться, а не исчезать совсем, потому что промышленный сектор является главной бюджетобразующей составляющей региональной, и вообще государственной экономики. При этом, развитие промышленного сильного государства невозможно проводить только за счёт её центральной части, не учитывая проблем промышленных регионов, территориально удалённых от центра.

Во-вторых – это отсутствие в обществе престижа инженерной профессии, которая требует серьёзной подготовки, при этом, условия инженерного труда на промышленном предприятии, например, в цехе, достаточно непростые, а заработная плата, мягко говоря, скромная.

В-третьих – это проблема формирования контингента абитуриентов в технических вузах, которая, по сути, является следствием двух первых.

Кроме того, не менее серьёзной является проблема оттока талантливых абитуриентов из регионов в центральные вузы в результате, так называемого, «широкого конкурса». Как показывает практика, очень небольшой процент выпускников столичных вузов возвращается в родной регион, что приводит к значительному сокращению человеческого капитала в промышленном секторе региональной экономики.

Таким образом, контингент студентов региональных технических вузов отличается не только качественными показателями, но и численностью.

В-четвертых – это проблема со своевременным обновлением материально-технического оснащения лабораторной базы технических университетов в соответствии с современными требованиями качественной инженерной подготовки.

И пятое – это низкий уровень оплаты труда профессорско-преподавательского состава, что в современных условиях является одним из важнейших препятствий к повышению качества инженерного образования. В первую очередь это обстоятельство

способствует оттоку наиболее квалифицированных и способных кадров из системы науки и образования в бизнес и производство, что не может позитивно сказаться на качестве образовательного процесса и внедрении инноваций.

Указанные проблемы существенно влияют на деятельность технических вузов, которые в одиночку, без поддержки государства, преодолеть их не в состоянии. Поэтому предлагаем следующие пути решения выше перечисленных проблем на государственном уровне:

1. С целью создания в обществе уважения к инженерному труду, разработать государственную программу повышения имиджа и привлекательности инженерного образования в Украине, в которой предусмотреть мероприятия по:

- подготовке молодежи к поступлению в технические вузы, за счёт повышения уровня физико-математической подготовки в общеобразовательных учреждениях страны. Предусмотреть в рамках профилизации обучения, введение в учебные планы специальных дисциплин (черчения, компьютерной графики и т.п.);

- модернизации и фундаментализации, а по сути универсализации образовательных и профессиональных стандартов инженерно-технического образования на первом (бакалаврском) уровне высшего образования (особенно это касается фундаментальной подготовки на 1–2 курсах), предусмотрев введение узкой специализации на втором (магистерском) уровне высшего образования;

- гарантированному трудоустройству молодых специалистов на предприятиях независимо от формы их собственности;

- повышению заработной платы инженерно-техническим работникам;

- пересмотреть условия поступления на технические специальности, которые происходят на основании «широкого конкурса», а именно:

- предусмотреть предоставление дополнительных баллов абитуриентам, поступающим на технические специальности в региональные вузы;

- предоставить возможность студентам, поступившим по результатам «широкого конкурса», продолжать получение определенного уровня высшего образования на госбюджетной основе независимо от изменения вуза.

А вообще, и такое мнение имеет место и в настоящее время активно обсуждается в образовательном сообществе, при поступлении в учреждения высшего, именно технического образования, нужно совсем отойти от системы «широкого конкурса» и определить фиксированные объёмы государственного заказа в целях сохранения человеческого капитала в промышленном секторе региональной экономики и научно-педагогического потенциала технических университетов, так как, в условиях его потери из-за уменьшения показателей госзаказа, вернуть преподавателей высшей квалификации будет практически невозможно. Поэтому второе предложение:

2. В целях обеспечения перспективного экономического развития промышленного сектора на местах инженерно-техническими кадрами и сохранения человеческого капитала на региональном уровне, разработать на государственном и местном уровнях перспективные планы промышленного развития регионов с определением по годам фиксированного необходимого количества специалистов по инженерно-техническим специальностям.

3. С целью качественного обеспечения внедрения процесса непрерывного обучения разработать Положение о создании и функционировании региональных образовательных холдингов: заведение профессионально-технического образования – колледж – университет.

4. С целью интеграции инженерно-технического образования, науки и производства разработать, согласно современным правовым нормам, Положения о создании и условиях функционирования учебно-научно-производственных комплексов; предусмотреть открытие на предприятиях, в научных учреждениях филиалов кафедр вузов, технопарков и т.п.

5. С целью повышения качества высшего технического образования предусмотреть:

- повышение оплаты труда профессорско-преподавательского состава до уровня развитых стран;
- уменьшение соотношения количества студентов на одного преподавателя для инженерно-технических специальностей;

- постоянное повышение квалификации преподавателей, которые готовят будущих инженеров, для чего, например, ввести Всеукраинские специализированные курсы по вопросам ознакомления с новейшими достижениями в науке и технике в Украине и в мире;

- обеспечение эффективного распределения финансовых ресурсов на расходы образовательных услуг из государственного и местных бюджетов в размерах, достаточных для развития технических вузов, учитывая состояние материально-технической и лабораторной базы, возможности воспроизведения потенциала научно-педагогических кадров и развития технической науки.

Однако, решение только «государственных» проблем в инженерном образовании хоть и является необходимым условием движения вперед, но недостаточным. Необходим поиск новых путей по оптимизации образовательного процесса в технических вузах для достижения целей и решения задач, стоящих перед инженерным образованием в области подготовки специалистов, свободно владеющих своей профессией и ключевыми компетенциями, способных к эффективной работе по специальности на уровне мировых стандартов, готовых к постоянному профессиональному росту, социальной и профессиональной мобильности.

Вступив в новый, информационный век, Украина задекларировала в качестве одной из стратегических задач развития страны переход к инновационному обществу и инновационной экономике, где

инновационное образование занимает центральное место. Вместе с тем, в настоящее время, система образования в украинских вузах, по сути, находится ещё на стадии только формирования предпосылок настоящего инновационных сдвигов [2].

В связи с этим, необходимо сформулировать основные цели, достижение которых будут способствовать обеспечению доступности и повышению качества образования, соответствующего мировым стандартам.

Состояние современного образования вообще и технического в частности, можно обозначить как поиск новых эффективных путей подготовки специалистов, уровень образования которых должен соответствовать проблемам непрерывно меняющейся социально-экономической ситуации в стране, который может обеспечить только использование новых образовательных технологий.

К основным направлениям внедрения новых технологий в ближайшее десятилетие следует отнести: образование в течение жизни с использованием дистанционных форм, интеграцию производства, науки и образования, что способствует повышению качества образования и реализации его практической составляющей, а также совершенствование современных методов оценки знаний.

Такие системные нововведения вызывают необходимость изменений в подходах к реформированию в высшем образовании, в первую очередь в главном звене образовательного процесса – кафедре.

Поэтому для реализации задач, которые стоят перед ХНТУ, каждая кафедра разработала основные направления концепции реорганизации и перспективного развития своего структурного подразделения, что позволило придать этому процессу характер последовательной и устойчивой перестройки образовательного процесса. Был проведён содержательный анализ организации и процесса воспроизводства образования в зарубежных и отечественных вузах, в сравнении со своей кафедрой, выявлены тенденции, противоречия и спорные решения и на базе этого сделаны прогнозы на будущее, даны предложения и рекомендации по основным направлениям развития образования.

Масштабность технологических перемен, вызванных освоением новых технологий, потребовала уже сегодня изменить учебные курсы, способы их преподавания и своевременно предусмотреть запросы потребителей образовательных услуг. В коллективе укрепилось мнение, что содержание вновь вводимых учебных дисциплин должно предусматривать текущие (а по сути – постоянно меняющиеся) требования к будущему специалисту, а это, в свою очередь, ставит перед кафедрами задачи, которые раньше никогда перед ними не стояли. Одна из них – формирование знаний и умений, достаточных для успешной работы в сфере деятельности, которая может быть востребована только в будущем, для которой только обозначены цели и ещё не до конца понятен перечень необходимых знаний и компетенций. Кроме того, очень важно,

чтобы кафедры были способны готовить не только будущих специалистов, но и параллельно с этим осуществлять курсовое обучение различного содержания, объёма и сроков обучения для повышения квалификации и переквалификации работников промышленности, поскольку технологии развиваются очень быстро, что приводит к расхождению между временем подготовки профессиональных кадров и временем использования полученных ими знаний.

Итак, рассмотрим инновационные методы образования, принятые в ХНТУ, которые могут быть предложены для внедрения в отечественные технические вузы уже в ближайшем будущем.

Первым среди таких направлений следует назвать демократизацию учебного процесса [7, 8].

По нашему мнению, демократизация учебного процесса означает предоставление студентам большего «права голоса» в вопросах целей образования, его содержания и методов обучения. Свообразным ориентиром в этом могут и должны стать требования и запросы будущих работодателей, как конечных потребителей образовательных услуг. А поможет в этом проведение широких социальных, психологических и других исследований совместно с преподавателями соответствующих гуманитарных кафедр с целью выявления реальных потребностей студентов, их отношения к тому, для чего и как их учат, их мотивации к обучению и максимально возможного использования результатов этих исследований в организации учебного процесса. В этом процессе демократизации большая роль должна быть отведена органам студенческого самоуправления, поскольку их представители непосредственно участвуют в проведении названных исследований, в прояснении отношений основной массы студентов к преподаванию отдельных дисциплин, работы отдельных преподавателей и др.

Следующее направление непосредственно связано с первым и во многом вытекает из него. Это – обеспечение автономии студентов в обучении [9, 10]. Имеется в виду постепенное превращение обучения в самообучение, когда студент попадает в условия, в которых он должен получать знания в основном за счёт творческой самостоятельной работы, проводя поиск необходимой для выполнения учебных задач информации и творчески её перерабатывая для того, чтобы сделать необходимые выводы и получить обусловленные учебными задачами результаты. Развитие такой учебной автономии требует обеспеченности учебными материалами и литературой для самостоятельной работы студентов, возможностями постоянно пользоваться информационными технологиями, в частности Интернетом. Именно разработка и обеспечение материалами и возможностями составляет наибольшую часть методической работы преподавателей в будущем.

Внедрение учебной автономии требует существенной и постоянной смены роли преподавателя в учебном процессе, которая является третьим направлением внедрения инновационных

методов обучения в инженерное образование [4, 5]. Из человека, который предоставляет информацию и проверяет её усвоение, преподаватель превращается в организатора их работы для самостоятельного поиска, творческого созидания, обработки полученной информации и трансформации её в новые знания и умения. Его главная функция – давать студентам направления и ориентиры, а также необходимую помощь в творческом самообучении. Такая функция предполагает и то, что привлечение преподавателем студентов к выполнению учебно-исследовательской и научно-исследовательской работы становится прямыми служебными обязанностями, без выполнения которых преподаватель не соответствует предъявляемым к нему профессиональным требованиям.

Всё вышеизложенное реализуется при условии внедрения четвёртого направления – индивидуализации учебного процесса [11–14].

Демократизация, учебная автономия студентов, работа с ними преподавателя как организатора самостоятельного приобретения новых знаний и навыков возможны, если учитываются особенности каждого студента, его психологические показатели и особенности восприятия, интересы, потребности, цели и др. Преподаватели должны внимательно изучать особенности своих студентов и приспосабливать к ним своё преподавание. Только при этих условиях можно раскрыть и использовать в учебных целях психологические резервы учащихся, превращать их из пассивных объектов педагогических усилий в активные субъекты – участников учебного процесса.

Важно и пятое направление, которое существенно помогает в реализации первых четырёх, и является внедрением в учебный процесс того, что называется кооперативным обучением [15]. Оно базируется на совместной работе студентов над учебными задачами проблемного характера (например, при выполнении учебных проектов). Кооперативное обучение даёт студенту важный опыт коллективной работы, неизбежной при будущем трудоустройстве, способствует объединению знаний, навыков и умений студентов, их способностей и возможностей, создаёт условия взаимообучения. По сути, происходит синергетическое объединение студентов, в результате чего создаются творческие группы, как структуры с более высоким качественным уровнем самоорганизации. Студенты начинают учиться друг у друга, так что потенциалы всех «присваиваются» каждому, в результате чего общий прогресс в обучении значительно ускоряется. Такое обучение требует организации учебного процесса, при которой как в аудитории, так и за её пределами студенты постоянно работают парами и малыми группами, отчитываясь о результатах самостоятельной и коллективной работы, как перед преподавателем, так и перед своей академической группой.

Кооперативное обучения, а также необходимость развивать творческие подходы и творческий потенциал студентов, вызывает необходимость во внедрении шестого направления. Это – использование

проблемного подхода к обучению [16, 17]. Этот подход требует такой постановки учебных задач для студентов, чтобы их выполнение обуславливало не просто репродуцирование полученных знаний, а творческое их использование для решения проблемных новых нестандартных задач в новых нестандартных ситуациях. В этом случае, выполняя учебные задания, студенты самостоятельно открывают и создают новые знания, приобретают навыки и умения (в частности, умение работать и принимать решения в нестандартных ситуациях), что чрезвычайно важно для эффективной будущей профессиональной деятельности.

Все ранее описанные направления тесно «связаны» и обуславливают необходимость ещё одного, седьмого. Это – интенсификация учебного процесса и максимальная активация студентов в нём [18–21].

Для этого кафедры могут использовать много методов и подходов, среди них следует назвать:

1. Преобразование традиционных лекций на интерактивные, а именно:

– внедрение собеседований, в том числе вопросно-ответных, со студентами во время лекции

– подготовка студентами самостоятельно, или под руководством преподавателя, презентаций в ходе лекции, которые бы раскрывали один из вопросов, поставленных в ней;

– проведение коротких тестов на 5–10 минут, которые бы демонстрировали понимание студентами изложенного материала, и др.

2. Преобразование практических занятий в, так называемые «мастерские», то есть такие виды занятий, где студенты в ходе обсуждений, дискуссий решают большие проблемы по специальности на основе собственных самостоятельных наработок, а не просто «опрашиваются» по материалу, начитанному на лекциях.

3. Проведение презентаций, самостоятельно подготовленных студентами по заданию преподавателя по тематике курсовых и дипломных проектов.

4. Широкое внедрение деловых игр.

5. Широкое внедрение кейсов.

6. Проведение мастер-классов представителями промышленности на практических занятиях.

7. Широкое использование мультимедийных средств в процессе чтения лекций и проведения практических занятий, предоставление студентам учебной информации на электронных носителях, самостоятельное изготовление студентами клипов по специальности, веб-страниц по заданию преподавателя и др.

Успех внедрения многих из семи названных направлений зависит от реализации восьмого – информатизации учебного процесса [22]. Учебный процесс должен быть достаточно насыщенным компьютерной техникой, чтобы каждый студент в любое время имел возможность вести поиск в Интернете, получать через Интернет задания от преподавателя и его комментарии по поводу их

выполнения, получать необходимые консультации, обмениваться информацией с другими студентами и получать всю необходимую информацию из учебного процесса, выполнять через Интернет общие учебные проекты со студентами других высших учебных заведений и др.

Девятым направлением является совершенствование системы контроля (в том числе тестового контроля) знаний, компетенций, навыков и умений, приобретённых студентами. Необходимо, чтобы система контроля обеспечивала не просто репродуцирование студентами полученных знаний. Главным в этой системе является то, как студент умеет их использовать для решения проблемных (и, в первую очередь, практических) задач. Значительное место здесь должно отводиться разработке электронных тестов, которые существенно повышают объективность, оперативность и массовость проведения контроля.

Наконец, последним, десятым направлением является теснейшая интеграция образования с производством и наукой, переход на новые принципы их взаимодействия. Усиление взаимной заинтересованности и ответственности вуза, предприятий, организаций и научных учреждений должно базироваться на договорных обязательствах, предусматривающих целевую подготовку и переподготовку кадров на государственной и платной основе. Возможно расширение (восстановление) практики переноса части учебного процесса на производство и научные учреждения путём создания учебно-научно-производственных комплексов (УНПК). Кроме того, данное направление хорошо согласуется с внедрением в современный процесс подготовки будущих инженеров дуального образования.

Таким образом, реализация рассмотренных выше десяти направлений, по мнению авторов, позволит вести учебный процесс на уровне мировых стандартов и требований.

### **Выводы**

1. На основе анализа современного состояния инженерного образования в Украине, предложены пути выхода из кризиса, как на государственном уровне, так и на уровне вуза.

2. Традиционные образовательные технологии не могут обеспечить необходимый уровень инженерной подготовки специалистов с учётом динамичного развития современной экономики.

3. Необходимым условием для обеспечения доступности и повышения качества инженерного образования, соответствующего современным мировым стандартам, является применение в учебном процессе инновационных технологий и моделей обучения.

4. Предложены направления инновационного развития инженерного образования, базирующиеся на реформировании учебного процесса, реализация которых даст возможность обучать будущих специалистов на уровне мировых стандартов и требований.

## Список литературы

1. Коротяев Б. И. Педагогика / Б. И. Коротяев, В. Н. Патлачук. – М. Интеллект, 2009. – 170 с.
2. Волович В. Болонский процесс и новая парадигма образования в Украине / В. Волович // Социология: теория, методика, маркетинг. – 2004. – № 4. – С. 189–199.
3. Петровский Г. Н. Современные образовательные технологии / Г. Н. Петровский. – Мн. : НИО, 2000. – 92 с.
4. Инновационные технологии в образовании: Материалы IV Международной научно-практической Видеоконференции (г. Тюмень, 30 ноября 2016 г.) / Под ред. С. М. Моор. – Тюмень : ТИУ, 2017. – 216 с. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.tyuiu.ru/wp-content/uploads/2015/10/Sborn-TSDO-2016.pdf>
5. Черкасов М. Н. Инновационные методы обучения студентов / М. Н. Черкасов // XIV Международная заочная научно-практическая конференция «Инновации в науке». Новосибирск, 2012. – С. 111–114.
6. Тимошенко С. П. Инженерное образование в России / С.П. Тимошенко. – Люберцы : ПИК ВИНТИ, 1997. – 84 с.
7. Латыпова Л. Н. Изучение нормативно-правового обеспечения учебного процесса в учреждениях в квалификационно-образовательных уровнях подготовки на современном этапе / Л. Н. Латыпова, С. А. Латыпов // Теория и практика общественного развития, 2014 – № 2. [Электронный ресурс]. Режим доступа. URL: <http://www.teoria-practica.ru/-2-2014/pedagogics/latipova-latipov.pdf>.
8. Трубникова Н. В. Гуманитарная среда в техническом вузе: применим ли опыт мировых лидеров в отечественном инженерном образовании? / Н. В. Трубникова // Инженерное образование. 2010 – №6. – С. 84–87.
9. Шершнева В. А. Учебная автономия студента в современной образовательной парадигме / В. А. Шершнева, А. С. Даниленко, И. Ф. Космидис // Вестник Красноярского государственного педагогического университета им. В. П. Астафьева, 2016. [Электронный ресурс]. Режим доступа. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/uchebnaya-avtonomiya-studenta-v-sovremennoy-obrazovatelnoy-paradigme>
10. Насонова Е. А. Анализ интерпретации понятия «учебная автономия» / Е. А. Насонова // Известия вузов. Сер. Гуманитарные науки, 2010. – №1 (2). – С. 145–149.
11. Якимович Н. В. Индивидуализация образовательного процесса на основе поисково-исследовательской деятельности / Н. В. Якимович // Личность, семья и общество: вопросы педагогики и психологии : Сб. ст. по матер. XVI междунар. науч.-метод. конф. Часть I. – Новосибирск : СибАК, 2012.
12. Кондратова Л. В. Индивидуальная работа студентов по педагогике / Л. В. Кондратова, В. К. Буряк, Л. А. Гапоненко. – Кривой Рог : КГПУ, 2009. – 155 с.
13. Егорова Г. И. Эффективные условия формирования профессиональной индивидуальности будущих инженеров в высшей школе / Г. И. Егорова // Фундаментальные исследования. – № 2. – Часть 5, 2015 – С. 1046–1051.
14. Горшкова А. А. Развитие субъективности студентов в рамках компетентного подхода / А. А. Горшкова // Инновации в образовании: проблемы, тенденции и перспективы развития : Материалы региональной науч.-метод. конф. – Тюмень : ТГНГУ, 2008. – С. 76–80.
15. Павенко Н. В. Кооперативное обучение как метод стимулирования познавательной активности студентов при изучении экономики (теоретический аспект) / Н. В. Павенко // Проблемы формирования новой экономики XXI века: материалы VIII Междунар. научно-практической. конф., 25–26 дек. 2014, Днепропетровск, 2014. – 61 с.
16. Проблемное обучение. [Электронный ресурс]. Режим доступа. URL: <https://studfiles.net/preview/3284621/page:16/>.
17. Махмутов М. И. Проблемное обучение. Основные вопросы теории / М. И. Махмутов. – М.: Педагогика, 1975. – 368 с.
18. Подковыров М. А. Технологическая и воспитательная составляющие методики по реализации компетентностно-деятельностного подхода при обучении студентов / М. А. Подковыров, А. Н. Олейник, М. Г. Уфимцева // компетентностно-деятельностный подход в системе современного образования: материалы XII международной науч.-практ. конф. Горно-Алтайск: РМНКО, 2010. – С. 152–155.
19. Юлдашев С. Ю. Инновационные методы обучения: особенности кейс-стади метода обучения и пути его практического использования. Учебное пособие / С. Ю. Юлдашев, Ш. И. Бобохужаев – [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://imoopk01\\_ru.pdf/](http://imoopk01_ru.pdf/)
20. Лаврентьев Г. В. Инновационные обучающие технологии в профессиональной подготовке специалистов / Г. В. Лаврентьев, Н. Б. Лаврентьева, Н. А. Неудахин. – Барнаул: Изд-во Алтайского государственного университета, 2002. – 146 с. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www2.asu.ru/cppkp/index.files/ucheb.files/innov/Part2/index.html>
21. Покушалова Л. В. Метод case-study как современная технология профессионально-ориентированного обучения студентов / Л. В. Покушалова // Молодой ученый. – 2011. – №5. Т.2. – С. 155–157. [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: <http://www.moluch.ru/archive/28/3073/>
22. Модульная объектно-ориентированная динамическая среда. [Электронный ресурс]. Режим доступа. URL: <https://moodle.org/Moodle-Open-Sourcelearningplatform>.

## References (transliterated)

1. Korotjaev B. I. *Pedagogika* [Pedagogy] Moscow. Intellect. 2009. 170 p.
2. Volovich V. *Bolonskij process i novaja paradigma obrazovaniya v Ukraine* [Bologna process and the new paradigm of education in Ukraine] Sociologija: teorija, metodika, marketing. 2004. No 4. pp. 189–199.
3. Petrovskij G. N. *Sovremennye obrazovatel'nye tehnologii* [Modern educational technology] Minsk. NIO. 2000. 92 p.
4. Moor S. M. *Innovacionnye tehnologii v obrazovanii: Materialy IV Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj Videokonferencii* [Innovative technologies in education: Proceedings of the IV International Scientific and Practical Video Conferencing] (Tjumen', 30 nojabrja 2016. Tjumen'. TIU. 2017. 216 p. URL: <https://www.tyuiu.ru/wp-content/uploads/2015/10/Sborn-TSDO-2016.pdf>
5. Cherkasov M. N. *Innovacionnye metody obuchenija studentov* [Innovative methods of educating of students] XIV Mezhdunarodnaja zaochnaja nauchno-prakticheskaja konferencija «Innovacii v nauke». Novosibirsk, 2012. pp. 111–114.
6. Timoshenko S. P. *Inzhenernoe obrazovanie v Rossii* [Engineering education in Russia] Ljubercy. PIK VINITI. 1997. 84 p.
7. Latypova L. N. *Izuchenie normativno-pravovogo obespechenija uchebnogo processa v uchrezhdenijah v kvalifikacionno-obrazovatel'nyh urovnjah podgotovki na sovremennom jetape* [Study of the normatively-legal providing of educational process in establishments in the qualificatory-educational levels of preparation on the modern stage]. Teorija i praktika obshhestvennogo razvitija, 2014. No 2. URL: <http://www.teoria-practica.ru/-2-2014/pedagogics/latipova-latipov.pdf>.
8. Trubnikova N. V. *Gumanitarnaja sreda v tehničeskom vuze: primenim li opyt mirovyh liderov v otechestvennom inzhenernom obrazovanii?* [Is there a humanitarian environment in technical institution of higher learning : will we apply experience of world leaders in home engineering education?]. Inzhenernoe obrazovanie. 2010. No6. P. 84–87.
9. Shershneva V. A. *Uchebnaja avtonomija studenta v sovremennoj obrazovatel'noj paradigme* [An educational autonomy of student is in a modern educational paradigm]. Vestnik Krasnojarskogo gosudarstvennogo pedagogičeskogo universiteta im. V. P. Astaf'eva, 2016. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/uchebnayaavtonomiya-studenta-sovremennoy-obrazovatelnoy-paradigme>
10. Nasonova E. A. *Analiz interpretacii ponjatija «uchebnaja avtonomija»* [Analysis of interpretation of concept "Educational autonomy"]. 2010. No1 (2). P. 145–149.
11. Jakimovich N. V. *Individualizacija obrazovatel'nogo processa na osnove poiskovo-issledovatel'skoj dejatel'nosti* [Individualization of educational process on the basis of searching-research activity]. Lichnost', sem'ja i obshhestvo: voprosy pedagogiki i psihologii. Sb. st. po mater. XVI mezhdunar. nauch.-metod. konf. Chast' I. Novosibirsk. SibAK. 2012.
12. Kondratova L. V. *Individual'naja rabota studentov po pedagogike* [Individual work of students on pedagogics]. Krivoj Rog. KGPU, 2009. 155 p.

13. Egorova G. I. Jeffektivnye uslovija formirovanija professional'noj individual'nosti budushhih inzhenerov v vysshej shkole [Effective terms of forming of professional individuality of future engineers are at higher school]. Fundamental'nye issledovanija. No 2. Chast' 5, 2015. P. 1046–1051.
14. Gorshkova A. A. Razvitie sub#ektivnosti studentov v ramkah kompetentnostnogo podhoda [Development of students' subjectivity in the framework of the competence approach]. Innovacii v obrazovanii: problemy, tendencii i perspektivy razvitija. Materialy regional'noj nauch.-metod. konf. Tjumen'. TGNGU. 2008. P. 76–80.
15. Pavenko N. V. Kooperativnoe obuchenie kak metod stimulirovanija poznavatel'noj aktivnosti studentov pri izuchenii jekonomiki (teoreticheskij aspekt) [Co-operative educating as method of stimulation of cognitive activity of students at the study of economy (theoretical aspect) ] Problemy formirovanija novoj jekonomiki XXI veka: materialy VIII Mezhdunar. nauchno-prakticheskij. konf., 25–26 dek. 2014, Dnepropetrovsk, 2014. 61 p.
16. Problemnoe obuchenie. [Problem educating.]. URL: <https://studfiles.net/preview/3284621/page:16/>.
17. Mahmutov M. I. Problemnoe obuchenie. Osnovnye voprosy teorii [Problem educating. Basic questions of theory] Moscow. Pedagogika. 1975. 368 p.
18. Podkovyrov M. A. Tehnologicheskaja i vospitatel'naja sostavljajushhie metodiki po realizacii kompetentnostnogo-dejatel'nostnogo podhoda pri obuchenii studentov [Technological and educational components of the methodology for the implementation of the competence-activity approach in teaching students] Kompetentnostnogo-dejatel'nostnyj podhod v sisteme sovremennogo obrazovanija: materialy XII mezhdunarodnoj nauch.-prakt. konf. Gorno-Altajsk: RMNKO, 2010. P. 152-155.
19. Juldashev S. Ju. Innovacionnye metody obuchenija: osobennosti kejs-stadi metoda obuchenija i puti ego prakticheskogo ispol'zovanija. Uchebnoe posobie [Innovative teaching methods: features of case study teaching method and ways of its practical use. Tutorial] URL: [http://imookpi01\\_ru.pdf/](http://imookpi01_ru.pdf/)
20. Lavrent'ev G. V. Innovacionnye obuchajushhie tehnologii v professional'noj podgotovke specialistov [Innovative teaching technologies are in professional preparation of specialists] Barnaul. Izd-vo Altajskogo gosudarstvennogo universiteta, 2002. 146 p. URL: <http://www2.asu.ru/cppkp/index.files/ucheb.files/innov/Part2/index.html>
21. Pokushalova L. V. Metod case-study kak sovremennaja tehnologija professional'no-orientirovannogo obuchenija studentov [The case-study method as a modern technology of vocational-oriented student learning] Molodoj uchenyj. 2011. No5. T.2. P. 155–157. URL: <http://www.moluch.ru/archive/28/3073/>
22. Modul'naja ob#ektno-orientirovannaja dinamicheskaja sreda [Modular object-oriented dynamic environment] URL: <https://moodle.org/Moodle-OpenSourcelearningplatform>.

*Надійшла (received) 21.10.2018*

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

**Бардачѐв Юрій Николаевич (Бардачов Юрій Миколайович, Bardachev Yuriy N.)** – доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки и техники Украины, ректор Херсонского национального технического университета +38050 396 00 96, [rectorat@kntu.net.ua](mailto:rectorat@kntu.net.ua)

**Розов Юрий Георгиевич (Розов Юрій Георгійович, Rozov Yuriy G.)** – доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки и техники Украины, первый проректор Херсонского национального технического университета +38050 494 55 66, [rozov.yg@gmail.com](mailto:rozov.yg@gmail.com)

Ю. А. ПЛЕСНЕЦОВ, Г. М. СУЧКОВ

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ВАЛКОВОЙ ФОРМОВКИ ПРОФИЛЕЙ НАСТИЛОВ С ПРОСЕЧНО-ВЫТЯЖНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ**

С целью изучения особенностей технологического процесса валковой формовки профилей с просечно-вытяжными элементами противоскольжения и получения данных, необходимых для его проектирования, на стане и на лабораторном оборудовании проведен комплекс экспериментальных исследований напряженно-деформированного состояния металла и энергосиловых параметров процесса. Компоненты напряженно-деформированного состояния металла определены с использованием метода измерения твердости и микротвердости, а также утонения металла в очаге деформации. Экспериментальные исследования, позволили определить усилия и крутящие моменты формовки как профиля в целом, так и отдельных просечно-вытяжных элементов, а также отбортовок. Установлен циклический характер технологического процесса, при котором в каждом цикле присутствуют три максимума, отражающие три характерные фазы формовки, связанные с окончанием формовки разного числа просечно-вытяжных элементов в поперечном сечении профиля. Измерен крутящий момент, необходимый для преодоления трения в подшипниках стана. Получена эмпирическая зависимость, позволяющая определить максимальное усилие деформирования, необходимое для формовки любого профиля с аналогичным размещением просечно-вытяжных элементов, если известно усилие формовки одного элемента. Формула может быть использоваться при моделировании процесса валковой формовки.

**Ключевые слова:** формовка в вальках, состояние напряженно-деформированное, параметры энергосиловые, исследования экспериментальные.

Ю. О. ПЛЕСНЕЦОВ, Г. М. СУЧКОВ

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ВАЛКОВОГО ФОРМУВАННЯ ПРОФІЛІВ НАСТИЛІВ З ПРОСІЧНО-ВИТЯЖНИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ**

З метою вивчення особливостей технологічного процесу валкового формування профілів з просічно-витяжними елементами протиковання і отримання даних, необхідних для його проектування, на стані і на лабораторному устаткуванні проведено комплекс експериментальних досліджень напружено-деформованого стану металу і енергосилових параметрів процесу. Компоненти напружено-деформованого стану металу визначені з використанням методу вимірювання твердості та микротвердості, а також стоншення металу в осередку деформації. Експериментальні дослідження, дозволили визначити зусилля і обертовий момент формування як профілю в цілому, так і окремих просічно-витяжних елементів, а також відбортувань. Встановлено циклічний характер технологічного процесу, при якому в кожному циклі присутні три максимуми, що відображають три характерні фази формування, пов'язані з закінченням формування різного числа просічно-витяжних елементів в поперечному перетині профілю. Виміряно обертовий момент, необхідний для подолання тертя в підшипниках стану. Отримано емпіричну залежність, що дозволяє визначити максимальне зусилля деформування, необхідне для формування будь-якого профілю з аналогічним розміщенням просічно-витяжних елементів, якщо відомо зусилля формування одного елемента. Формула може використовуватися при моделюванні процесу валкового формування.

**Ключові слова:** формування в вальках, стан напружено-деформований, параметри енергосилові, дослідження експериментальні.

YU. A. PLESNETSOV, G. M. SUCHKOV

**EXPERIMENTAL RESEARCH OF THE PROCESS OF THE ROLL FORMING PROFILES OF CUTTINGS WITH CROSS-EXTENSION ELEMENTS**

In order to study the peculiarities of the technological process of roll forming of profiles with expanded metal anti-skid elements and obtain the data necessary for its design, a set of experimental studies of the stress-strain state of the metal and the power parameters of the process was carried out on the mill and on the laboratory equipment. The components of the stress-strain state of the metal are determined using the method of measuring hardness and microhardness, as well as thinning the metal in the deformation zone. Experimental studies made it possible to determine the efforts and torques of forming both the profile as a whole, and individual expanded elements, as well as flanging. The cyclical nature of the technological process is established, in which there are three maxima in each cycle, reflecting three characteristic phases of the molding, associated with the completion of the molding of a different number of expanded metal elements in the cross section of the profile. Measured torque required to overcome friction in the bearings of the mill. An empirical relationship is obtained, which allows to determine the maximum deformation force required for the molding of any profile with a similar placement of expanded metal elements, if the molding force of a single element is known. The formula can be used in simulating the roll forming process.

**Keywords:** roll forming, stress-deformed state, energy-power parameters, experimental studies.

**Введение.** Для подтверждения правильности исходных предпосылок теоретического анализа, определения степени точности найденных аналитических зависимостей, а также с целью получения дополнительных сведений, необходимых для разработки и проектирования нового технологического процесса валковой формовки профилей настилов с просечно-вытяжными элементами (ПВЭ), были проведены исследования напряженно-деформированного состояния металла при формовке, а также определены энергосиловые параметры процесса.

**Методы, оборудование и аппаратура для проведения экспериментальных исследований.** Для измерения крутящих моментов и усилий

деформирования использован метод электротензометрии [1–5]. Для исследования пластического формоизменения металла использовали также один из геометрических методов – метод измерения утонений. Известно, что изменение физико-механических свойств металла при его пластической деформации обуславливает изменение его твердости. Следовательно, определив соотношение между твердостью и соответствующими механическими характеристиками металла, можно провести качественный и количественный анализ его напряженно-деформированного состояния на данной стадии формоизменения. На этом принципе основан метод измерения твердости, который использовался при изучении напряженно-деформированного



состояния металла. Метод измерения твердости включает следующие этапы: построение градуировочного графика зависимости между твердостью по Виккерсу, интенсивностью напряжений и интенсивностью деформаций при ступенчатом растяжении образцов и определение соответствующих этой твердости интенсивности напряжений и деформаций по зависимостям:

$$e = \ln \frac{l}{l_0},$$

где  $l_0$  и  $l$  – начальная и конечная длина образца (соответственно);

$$\sigma_i = \frac{F}{S},$$

где  $F$  – усилие деформирования;

$S$  – площадь поперечного сечения образца.

2. Измерение твердости в различных точках исследуемого объекта после деформирования и построение графика распределения твердости.

3. Построение графиков распределения интенсивности напряжений и интенсивности деформаций по участкам объекта на основе градуировочных графиков.

4. Определение главных деформаций (при плоском деформированном состоянии), которые пропорциональны интенсивности деформаций и определяются по зависимости

$$e_1 = -e_3 = \frac{\sqrt{3}}{2} e_i.$$

Поскольку метод измерения твердости обеспечивает возможность качественного и количественного анализа деформированного состояния металла с учетом его деформационного упрочнения, этот метод был выбран в качестве основного метода экспериментальных исследований

напряженно-деформированного состояния металла профилей с ПВЭ. Дополнительно использовали метод измерения микротвердости, так как установлено, что для большинства сталей и сплавов существует зависимость между макротвердостью и микротвердостью, имеющая вид

$$HV = kH,$$

где  $HV$  – число единиц макротвердости по Виккерсу;

$H$  – число единиц микротвердости;

$k$  – эмпирический коэффициент, равный 0,7...0,8.

Кроме проверки правильности первичной информации, полученной методом измерения твердости, метод измерения микротвердости позволяет качественно оценить степень неоднородности механических свойств листовой заготовки по конфигурации получаемых отпечатков.

В работе определяли усилия и крутящие моменты с использованием метода электротензометрии.

Отбор проб, заготовок и образцов от исходных материалов для проведения экспериментальных исследований проводили по ГОСТ 7564. Образцы испытывали на растяжение (ГОСТ 1497) на испытательной машине ZD-10/90. Твердость измеряли на твердомере ТК по Виккерсу согласно ГОСТ 2999 при нагрузке на индентор 294 Н, микротвердость  $H$  – по ГОСТ 9450 при нагрузке 0,098 Н. Металлографические исследования были проведены на оптическом микроскопе NU-2E при 100-кратном увеличении (по ГОСТ 1778). Исследования валковой формовки профилей с ПВЭ были проведены на стане 550. Технология валковой формовки была опробована для двух марок стали – ВСт. 3кп и 09Г2. Анализ химического состава и механических свойств сталей показал их соответствие требованиям ГОСТ 19282 и ГОСТ 11474. Результаты соответствующих исследований приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Химический состав и механические свойства стали 09Г2, использовавшейся при проведении экспериментальных исследований

Содержание элементов, %								Мех. свойства		
C	Si	Mn	Ni	Cu	Al	P	S	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_b$ , МПа	$\delta_5$ , %
0,13	0,26	0,70	0,07	0,33	0,007	0,02	0,024	287	388	23

**Результаты исследований.** Металлографические исследования, проведенные с целью выявления неоднородностей металла и включений, которые могли повлиять на результаты исследований, показали, что микроструктура образцов исходных листовых заготовок – однотипная, феррито-перлитная, мелкозернистая – 7-8 баллов. Полосчатость структуры не превышает 1 балла.

*Твердость* измеряли на стандартных продольных и поперечных образцах (сталь 09Г2), отобранных из различных участков исходных листовых заготовок на поверхности, контактировавшей с валками при прокатке, и на перпендикулярной к ней (торцовой). Обусловленные этим различия в результатах не превышали 2%. В дальнейшем, поскольку

большинство исследованных участков профиля имели криволинейную поверхность, твердость темплетов измеряли на их торце, что обеспечило большую точность измерений диагоналей отпечатков индентора. По результатам статистической обработки полученных экспериментальных данных (табл. 2) был определен исходный уровень твердости.

Ввиду незначительности полученных отклонений этот уровень принят был равным  $(138,81^{+1,28}) HV$ . Для проверки правильности его определения измеряли также микротвердость  $H$  феррита исходных заготовок. Она составляет  $(183,4^{+0,9})H$ , подтверждает правильность определения уровня твердости исходного материала (см. приведенное выше соотношение  $HV$  и  $H$ ).

Таблица 2 – Результаты измерения твердости исходных образцов

Число измерений, $n$	Среднее значение, $\bar{x}$	Дисперсия, $D$	Среднеквадратичное отклонение, $S$	Коэффициент вариации ( $V$ ), %	Доверительный интервал при вероятности 0,95
100	138,81	50,81	7,13	5,14	1,28

Испытаниями на растяжение продольных и поперечных образцов выявлена изотропность механических свойств исходного материала, что дополнительно подтверждается правильной симметричной формой отпечатков индентора при замерах твердости и микротвердости.

Для экспериментального определения зависимости между твердостью  $HV$  и интенсивностями напряжений  $\sigma_i$  и деформаций  $e_i$  подготовленные образцы с известными уровнями исходной твердости растягивались до различных степеней деформации, после чего вновь измерялась твердость. С использованием приведенных выше выражений были построены градуировочные графики. С большой точностью (коэффициент корреляции 0,95) они могут быть аппроксимированы полиномом

$$y = ax + bx^2 + cx^3.$$

После подбора коэффициентов с использованием ПК полином принял вид:

$$\sigma_i = -8,048HV + 0,118HV^2 - 0,0003HV^3;$$

$$e_i = 1,79 \times 10^{-3}(HV - 138,81) + 8,91 \times 10^{-5}(HV - 138,81)^2 - 6,27 \times 10^{-7}(HV - 138,81)^3.$$

Функциональная связь  $\sigma_i = f(e_i)$  аппроксимирована зависимостью вида

$$\sigma_i = A_0 + A_1z + A_2z^2 + A_3z^3,$$

где  $A_0 - A_3$  – постоянные коэффициенты;

$$z = e_{пл} - e_y = e_{пл} - 0,002,$$

где  $e_y$  и  $e_{пл}$  – упругая и пластическая деформация, соответственно.

Для стали 09Г2 предыдущая зависимость принимает вид:

$$\sigma_i = 287 + 1603(e_i - 0,002)^2 - 3512(e_i - 0,002)^3.$$

Коэффициент корреляции для полученной зависимости составляет 0,99.

Для экспериментального определения напряженно-деформированного состояния металла профиля настила в зоне формовки ПВЭ использовали темплеты шириной 3 мм, отобранные таким образом, чтобы можно было сделать замеры с шагом 2 мм в десяти сечениях, параллельных линии просечки, и в перпендикулярных им сечениях, проходящих по гребню элемента. Измерения были проведены на 20 элементах из крайних и из центральных рядов. Различия в результатах, обусловленные расположением элемента по ширине профиля, зафиксированы не были в связи с большой жесткостью валов используемого стана.

С использованием большого инструментального микроскопа БМИ выполнены замеры утонения. Во всех сечениях результаты измерений в сопоставимых точках были практически идентичны. На участке,

отформованном конической частью диск-пуансона, качественный характер распределения утонений сохраняется, но их абсолютная величина затухала до нуля по мере приближения к плоскому участку.

В результате экспериментальных исследований установлено, что деформация растяжения не распространяется за пределы элемента противоскольжения. Утонение в конической части элемента противоскольжения значительно (на 25%) меньше, чем при вытяжке аналогичных закрытых гофров, так как элементы с одной стороны открыты и металл при формовке как бы соскальзывает с диск-пуансона, в результате чего вытяжка с утонением частично заменяется отгибкой. Сопоставление полученных результатов показывает, что утонение и твердость изменяются по продольному сечению ПВЭ аналогично и достигают максимума на одних и тех же участках. Это свидетельствует о корректности постановки эксперимента и правильности выполнения измерений. Следует также отметить, что увеличение твердости на 20% в верхней части ПВЭ, ответственной за обеспечение служебных свойств настила, положительно сказывается на его износостойкости и долговечности.

**Экспериментальное определение энергосиловых параметров процесса валковой формовки листовых профилей с просечно-вытяжными элементами противоскольжения.**

В процессе отработки технологии производства профилей НПП-660 и изготовления их опытной партии выполнены замеры усилий и крутящих моментов.

Для точного фиксирования момента окончательной отформовки элемента противоскольжения помеченной парой диск-пуансонов на валках были закреплены замыкающие контакты электрической цепи.

Механические свойства металла заготовок определяли на плоских 10-кратных образцах. В результате установлено, что: для стали ВСтЗкп  $\sigma_{0,2} = 250$  МПа,  $\sigma_b = 380$  МПа,  $\delta_{10} = 22\%$ ; для стали 09Г2  $\sigma_{0,2} = 310$  МПа,  $\sigma_b = 440$  МПа,  $\delta_{10} = 26\%$ , то есть все значения, установленные экспериментально, соответствовали справочным.

Перед опытным профилированием зазор между рабочими валками устанавливали равным 2,45 мм с учетом пружинения клетки.

При формовке настила НПП-660 имеют место три характерные фазы:

- 1) формовка двух элементов заканчивается, а четырех – находится в начальной стадии;
- 2) формовка четырех элементов заканчивается, а четырех – находится в начальной стадии;
- 3) формовка четырех элементов заканчивается, а двух – находится в начальной стадии.

Каждой из этих фаз соответствует свой уровень максимальных усилий и крутящих моментов.

Суммарное усилие формовки всего настила  $F_c$  имеет две составляющие:

- усилие формовки отбортовок  $F_o$ ;
- суммарное усилие формовки элементов противоскольжения  $F_{\varepsilon 1}$ ,  $F_{\varepsilon 2}$ ,  $F_{\varepsilon 3}$  (в зависимости от того, сколько диск-пуансонов одновременно участвует в формовке профиля).

Элементы противоскольжения расположены таким образом, что при формовке всего настила в работе участвуют сразу несколько диск-пуансонов на различных стадиях формирования элементов, поэтому измерения усилий и крутящих моментов позволяют определить максимальные нагрузки, но не позволяют определить долю нагрузки, приходящуюся на формовку каждого отдельного элемента. Для оценки этой доли энергосиловые параметры измеряли при формовке не только профиля в целом (включая отбортовки у кромок), но и двух центральных рядов, в которых элементы противоскольжения находятся на одной линии и формируются одновременно, на полосах шириной 130 мм и длиной 2400 мм. Для того, чтобы исключить случайные факторы (биение валков, недостаточная точность изготовления сепараторов и диск-пуансонов и др.) и получить сопоставимые результаты, формовку каждой полосы начинали одной и той же парой диск-пуансонов.

Исследованиями установлено, что максимальное усилие при формовке двух соседних элементов из центральных рядов (среднее по десяти измерениям) на стали ВСт. 3кп равно 58,0 кН, на 09Г2 – 75,4 кН. Следовательно, максимальное усилие формовки

одного элемента составляет 29,0 кН и 37,7 кН, соответственно.

При формовке на узкой полосе любых двух других соседних рядов элементов противоскольжения (кроме центральных) перед окончанием формовки элемента в одном ряду начинается формовка элемента в соседнем, поэтому максимальное усилие в момент окончательной доформовки каждого элемента равно 43,3 кН и 55,9 кН для сталей ВСт. 3кп и 09Г2, соответственно, то есть увеличивается почти на 50%. Столь значительные усилия на начальной стадии формовки элементов связаны с разрезкой металла нижней частью диск-пуансона, имеющей небольшой скос. Таким образом, суммарное усилие  $F_c$  формовки всех ПВЭ просечного настила можно рассчитать по формуле:

$$F_c = F_1(m + 0,5n), \quad (4.11)$$

где  $F_1$  – максимальное усилие формовки одного ПВЭ;  
 $m$  – число элементов, расположенных на одной линии, формовка которых заканчивается одновременно;

$n$  – число элементов, начало формовки которых совпадает с завершением формовки  $m$  предыдущих элементов в других рядах.

Усилия формовки отбортовок  $F_o$  измеряли на двух узких полосах, заданных в крайние участки калибра. Величины этих усилий и максимальных усилий  $F_{Ci}$  для трех фаз формовки приведены в табл. 3.

Таблица 3 – Результаты измерений энергосиловых параметров валковой формовки профиля НПП-660.

Марка стали	Усилия формовки $F$ , кН и крутящие моменты $M$ , кН·м								
	$F_o$	$F_{C1}$	$F_{C2}$	$F_{C3}$	$M_o$	$M_{тр}$	$M_{C1}$	$M_{C2}$	$M_{C3}$
ВСт. 3	12,6	120,0	182,0	153,3	0,21	0,68	2,10	3,27	2,92
09Г2	16,5	159,8	236,5	195,2	0,27	0,88	2,73	4,22	3,79

Суммарный максимальный крутящий момент  $M_c$  при формовке всего профиля включает три составляющие:

$$M_c = M_o + M_{\varepsilon} + M_{тр},$$

где  $M_o$  – момент формовки отбортовок;

$M_{\varepsilon}$  – момент формовки элементов противоскольжения, который, как и усилия, имеет три пиковых значения  $M_{\varepsilon 1}$ ,  $M_{\varepsilon 2}$ ,  $M_{\varepsilon 3}$  – в зависимости от того, сколько диск-пуансонов одновременно участвует в формовке;

$M_{тр}$  – момент трения в подшипниках валков.

При определении крутящих моментов за нулевую отметку на осциллограмме принимали крутящий момент холостого хода. Максимальные крутящие моменты, измеренные на ведущем шпинделе при одновременной формовке двух элементов, составили 1,56 кНм и 2,01 кНм, то есть на формовку одного элемента приходится 0,78 кНм или 1,00 кНм (стали ВСт. 3кп и 09Г2, соответственно), т.е. больше расчетных величин, равных 0,61 кНм и 0,80 кНм. Это объясняется большими потерями на трение в подшипниках валков, которые представляют собой подшипники скольжения с текстолитовыми вкладышами.

Долно крутящего момента, приходящуюся на преодоление трения в опорах валков (подшипниках), определяли, пренебрегая потерями на трение качения валков по полосе и трением в согласующей зубчатой передаче следующим образом. В плоские крайние участки калибров задавали полосы шириной 130 мм, с помощью нажимных устройств зажимляли их между валками, доводя усилия зажима до уровня максимального усилия одновременной формовки двух элементов из центральных рядов и, включив стан, измеряли крутящий момент на шпинделе. Он составил 0,24 кНм для стали ВСт. 3кп и 0,28 кНм – для стали 09Г2. Вычитая эту величину из суммарного максимального крутящего момента  $M_{C2}$ , полученного при формовке двух элементов из центральных рядов, получаем крутящий момент одновременной формовки двух элементов. Следовательно, крутящий момент, необходимый для формовки одного элемента противоскольжения на стали ВСт. 3кп, равен 0,54 кНм, на 09Г2 – 0,73 кНм, что на 11% меньше расчетных значений. Этим также подтверждается возможность использования разработанной методики расчета энергосиловых параметров формовки профилей с ПВЭ.

Аналогично определяли долю крутящего момента, приходящуюся на преодоление трения в подшипниках при формовке всего профиля. При усилии защемления полос, равном максимальному усилию формовки профиля  $F_{C2}$ , крутящий момент  $M_{тр}$  был равен 0,68 или 0,88 кН·м. Вычитая эту величину из суммарного максимального крутящего момента  $M_{C2}$ , установили, что максимальный крутящий момент, необходимый для формовки на стане 550 профиля настила НПП-660, равен 2,59 кНм или 3,35 кНм для сталей ВСт. 3 и 09Г2, соответственно. Различия по усилиям и крутящим моментам при использовании этих сталей находятся в пределах их механических свойств.

Исходя из найденных значений энергосиловых параметров формовки и геометрических размеров профиля настила НПП-660 сделать вывод о том, что единственным в Украине профилегибочным агрегатом, на котором можно освоить производство этого и других аналогичных по размерам профилей с ПВЭ без реконструкции оборудования, является ПГА 1...4x400...1500 МК «Запоржсталь».

#### Выводы.

1. С целью изучения особенностей технологического процесса валковой формовки профилей с просечно-вытяжными элементами противоскольжения и получения данных, необходимых для его проектирования, на стане 550 и на лабораторном оборудовании проведен комплекс экспериментальных исследований напряженно-деформированного состояния металла и энергосиловых параметров процесса.

2. Компоненты напряженно-деформированного состояния металла определены с использованием метода измерения твердости и микротвердости, а также утонения металла в очаге деформации. Для установления зависимости между твердостью  $HV$ , интенсивностями деформаций  $e_i$  и напряжений  $\sigma_i$  проведена серия ступенчатых испытаний на растяжение образцов используемой стали до различных степеней деформации, после чего вновь измеряли их твердость. В результате получены градуировочные графики, построена номограмма для определения интенсивности напряжений  $\sigma_i$ . Градуировочные графики и график зависимости  $\sigma_i=f(e_i)$  аппроксимированы полиномами третьей степени. Проведены измерения твердости металла в зоне формовки ПВЭ. С использованием градуировочных графиков установлено распределение интенсивности деформаций  $e_i$  и напряжений  $\sigma_i$ , определены главные деформации.

3. При освоении технологии производства профилей НПП-660 методом тензометрии определены энергосиловые параметры процесса их формовки. Экспериментальные исследования, позволили определить усилия и крутящие моменты формовки как профиля в целом, так и отдельных просечно-вытяжных элементов, а также отбортовок. Установлен циклический характер технологического процесса. Измерен крутящий момент, необходимый для преодоления трения в подшипниках стана. В каждом цикле присутствуют три максимума, отражающие три характерные фазы формовки, связанные с окончанием формовки разного числа ПВЭ в поперечном сечении профиля. Максимальное усилие формовки профиля НПП-660 из стали ВСт. 3кп – 182,0 кН; из стали 09Г2 – 236,5 кН, крутящие моменты – 3,27 кНм и 4,22 кНм, соответственно. Получена эмпирическая зависимость, позволяющая определить максимальное усилие деформирования, необходимое для формовки любого профиля с аналогичным размещением ПВЭ, если известно усилие формовки одного элемента. Формула может использоваться при моделировании процесса валковой формовки.

#### Список литературы

1. Тришевский И.С., Юрченко А.Б., Марьин В.С. Производство гнутых профилей. Оборудование и технология. – Москва: Metallurgiya, 1982. – 384 с.
2. Производство применение гнутых профилей проката. Справочник. Под редакцией И. С. Тришевского. – Москва: Metallurgiya, 1975. – 536 с.
3. Тришевский И.С., Докторов М.Е. Теоретические основы процесса профилирования. – Москва: «Metallurgiya», 1980, – 288 с.
4. Тришевский И. С., Алексеев Ю. Н., Докторов М. Е. Элементы теории профилирования. – Харьков: Изд. УКРНИИМЕТа 1970. – 112 с.
5. Тришевский И. С., Докторов М. Е. Исследование процесса формоизменения полосы на участке плавного перехода при профилировании. Бюл. Черметинформации, 1971, № 18. С. 49–50.

#### References (transliterated)

1. Trishevskiy I.S., Yurchenko A.B., Mar'in V.S. Proizvodstvo gnutykh profiley. Oborudovaniye i tekhnologiya. – Moscow: Metallurgiya, 1982. – 384 p.
2. Proizvodstvo primeneniye gnutykh profiley prokata. Spravochnik. Pod redaktsiyey I. S. Trishevskogo. – Moscow: Metallurgiya, 1975. – 536 p.
3. Trishevskiy I.S., Doktorov M.Ye. Teoreticheskiye osnovy protsessy profilirovaniya. – Moscow: «Metallurgiya», 1980, s. 288 p.
4. Trishevskiy I. S., Alekseyev YU. N., Doktorov M. Ye. Elementy teorii profilirovaniya. – Kharkov: Izd. UKRNIIMETA 1970. – 112 p.
5. Trishevskiy I. S., Doktorov M. Ye. Issledovaniye protsessy formoizmeneniya polosy na uchastke plavnogo perekhoda pri profilirovanii. Byul. Chermetinformatsii, 1971, No 18. P. 49–50.

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

**Плеснецов Юрій Олександрович (Плеснецов Юрий Александрович, Plesnetsov Yuriy Aleksandrovich)** – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна, професор кафедри «Обробка металів тиском», e-mail: plesnetsov@gmail.com

**Сучков Григорій Михайлович (Сучков Григорий Михайлович, Suchkov Hrigoriy Mihailovich)** – доктор технічних наук, професор, зав. кафедри «Комп'ютерні та радіоелектронні системи контролю та діагностики», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна, e-mail: hpi.suchkov@gmail.com

УДК 621.967

*В. Л. КАЛЮЖНИЙ, Д. В. КАСЯН, Р. Л. РУСАКОВ***АНАЛІЗ МЕТОДОМ СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ ПРОЦЕСУ НЕПОВНІСТЮ ВІДКРИТОГО ВІДРІЗАННЯ ЗАГОТОВОК ІЗ КРУГЛОГО ПРОКАТУ ЗСУВОМ У ШТАМПІ НА ПРЕСІ**

Показана та описана схема неповністю відкритого відрізання заготовок із круглого прокату в штампі на пресі. Методом скінченних елементів, з використанням програми DEFORM-3D, створено математичну модель та проведений комп'ютерний аналіз вказаного процесу для отримання заготовок із маловуглецевої сталі. Використана пружно-пластична модель металу. Виявлений вплив величини зазору між рухомим та нерухомим ножами на енергосилові параметри відрізання, напружений стан в осередку деформації та кінцевий деформований стан в момент відокремлення заготовки. Встановлені залежності ертикального та поперечного зусиль відрізання на рухомому ножі від його переміщення. Приведений розподіл компонент напружень при максимальному значенні зусилля відрізання, а також показаний розподіл питомих зусиль на контактуючих поверхнях між заготовкою, що відрізається, та ножами. Визначено вплив величини зазору між ножами на напрямок розвитку тріщин у прутку при відрізання. Наведений розподіл деформацій в осередку відрізання. Установлені форми і розміри заготовки після відрізання. Розрахунковим шляхом визначені всі необхідні дані для проектування технології та штампного оснащення для відрізання заготовок довжиною 10 мм із прутка діаметром 10 мм.

**Ключові слова:** відрізання заготовок; круглий прокат; метод скінченних елементів; зусилля відрізання; пластинчатий ніж; втулочний ніж; напруження; деформації.

*В. Л. КАЛЮЖНИЙ, Д. В. КАСЯН, Р. Л. РУСАКОВ***АНАЛИЗ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРОЦЕССА НЕПОЛНОСТЬЮ ОТКРЫТОЙ ОТРЕЗКИ ЗАГОТОВОК ИЗ КРУГЛОГО ПРОКАТА СДВИГОМ В ШТАМПАХ НА ПРЕССЕ**

Показана и описана схема неполностью открытой отрезки заготовок из круглого проката в штампе на прессе. Методом конечных элементов, с использованием программы DEFORM-3D, создана математическая модель и проведен компьютерный анализ указанного процесса для получения заготовок из малоуглеродистой стали. Использована упруго-пластическая модель металла. Выявлено влияние величины зазора между подвижным и неподвижным ножами на энергосиловые параметры отрезки, напряженное состояние в очаге деформации и конечное деформированное состояние в момент отделения заготовки. Установлены зависимости осевого и поперечного усилий отрезки на подвижном ноже от его перемещения. Приведены распределения компонент напряжений при максимальном значении усилия отрезки, а также показано распределение удельных усилий на контактирующих поверхностях между заготовкой, что отрезается, и ножами. Определено влияние величины зазора между ножами на направление развития трещины в прутках при отрезке. Приведены распределения деформаций в очаге деформации. Установлены формы и размеры заготовки после отрезки. Расчетным путем определены все необходимые данные для проектирования технологии и штамповой оснастки для отрезки заготовок длиной 10 мм из прутка диаметром 10 мм.

**Ключевые слова:** отрезка заготовок; круглый прокат; метод конечных элементов; усилия отрезки; пластинчатый нож; напряжения; деформации.

*V. KALJUZHNY, D. KASIAN, R. RUSAKOV***ANALYSIS OF THE PROCESS OF INCOMPLETELY OPEN CUTTING OF WORKPIECE OF A ROUND METAL RODS WITH SHEAR IN PRESS DIE BY THE FINITE ELEMENT METHOD**

The scheme of incompletely open cutting of round-rolled billets in a press on a press is shown and described. The finite element method using the DEFORM-3D program created a mathematical model and conducted a computer analysis of the process for obtaining billets from low carbon steel. Used elastic-plastic model of metal. The influence of the size of the gap between moving and stationary knives on the energy-power cutoff parameters, the stressed state in the deformation cell and the final deformation state at the time of the workpiece separation are found. The dependencies of the axial and transverse cutting forces on the moving knife from moving it are established. The distribution of stress components at the maximum value of the cutoff effort is shown, as well as the distribution of specific forces on the contact surfaces between the cut-off billet and the knives. The influence of the size of the gap between the knives on the direction of development of the cracks in the bar at the cutting is determined. The distribution of the deformation component in the cutting branch is given. Established forms and size of the workpiece after cutting. All the necessary data for the design of technology and stamp equipment for the cutting of 10 mm billets from a 10 mm diameter bar are determined by calculation.

**Keywords:** cutting of workpeace; round rods; finite element method; cutting force; movable plate cutter; sleeve cutter; stress; strain.

**Вступ.** Вихідні заготовки із круглого прокату під подальше формоутворення виробів процесами холодного об'ємного штампування в основному отримують способами відрізання на токарних верстатах та відрізанням зсувом в штампах на пресах. Процес відрізання зсувом в штампах на пресах характеризується високою продуктивністю та являється практично безвідхідним в порівнянні з отриманням заготовок на токарних верстатах.

Основи теорії процесів відрізання, рекомендації по конструктивних, енерго-силових режимах та по проектуванню штампного оснащення для різних схем відрізання викладені в джерелі [1]. В теперішній час відрізанням заготовок зсувом в штампах отримують

заготовки діаметром до 80 мм [2]. У цій роботі також приведені рекомендації по розташуванню прутків відносно напрямку сили відрізання, які дозволяють зменшити енерго-силові режими для відрізання заготовок більших за 80 мм.

В останній час в області розділення сортового прокату на заготовки відбувається пошук шляхів підвищення якості отриманих заготовок. В роботах [3–5] показано, що створення додаткового гідростатичного тиску в осередку деформації при відрізання заготовок дозволяє суттєво підвищити точність форми зовнішньої поверхні та торців відокремленої заготовки. Для цього запропоновані відповідні конструкції штампів. Використання

обертально-поступального руху ножів при відрізання також забезпечує підвищення якості отриманих заготовок [6, 7]. Покращення якості в напівфабрикатів і виробів в розділових процесах обробки металів тиском, зокрема і при відрізання заготовок із прутків круглого і фасонного перерізу, забезпечується створенням нового спеціалізованого ковальсько пресового обладнання для вказаних процесів [8, 9].

Актуальними задачами для відрізання заготовок із прутків в штампах є подальше доскональне дослідження закономірностей відрізання, силових режимів, питомих зусиль на ножах з урахування комплексного впливу конструктивних і технологічних факторів, які впливають на цей процес. Такі задачі можна вирішити шляхом комп'ютерного моделювання з використанням метода скінченних елементів (МСЕ) [10, 11]. Особливо це важливо для способу неповністю відкритого відрізання, який широко використовують для виробництва мірних вихідних заготовок під подальше холодне об'ємне штампування.

**Мета роботи.** Метою роботи є використання метода скінченних елементів для встановлення впливу осьового зазору на параметри неповністю відкритого відрізання заготовок із круглого прутка в штампі на пресі.

**Виклад основного матеріалу.** Схема процесу неповністю відкритого відрізання [1] заготовок із круглого прокату зсувом в штампі на пресі приведена на рис. 1. Пруток 1 діаметром  $d$  подають через нерухомий втулочний ніж 2, який розміщений в корпусі 3. Втулочний ніж має ширину  $b$  і отвір діаметром  $d_n$ . Корпус 3 закріплений на нижній плиті 4 штампа. Переміщення прутка при подачі обмежено упором 5, який визначає довжину заготовки  $l$ , що відрізається. Рухомий пластинчастий ніж 6 шириною  $b$  закріплений в корпусі 7, а корпус 7 зафіксований до верхньої плити 8 штампа.

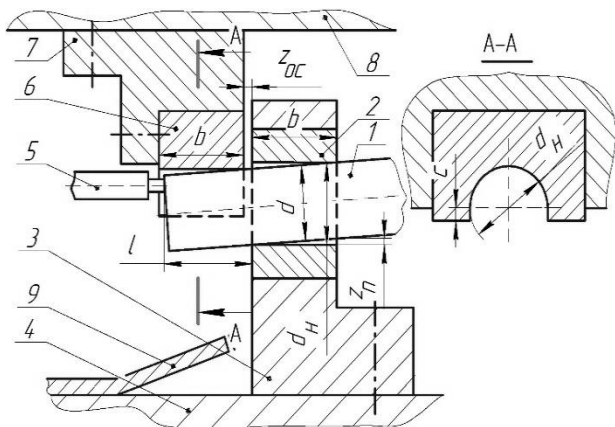


Рис. 1 – Схема процесу неповністю відкритого відрізання заготовок із круглого прокату зсувом в штампі

Ніж 6 має круглу робочу поверхню діаметром  $d_n$  і пряму частину висотою  $c$ . Відрізання заготовки виконується при переміщенні верхньої плити 8 з ножом 6 вниз, а отримана заготовка скочується по похилій поверхні лотка 9. Між прутком 1 і нерухомим

ножом 2 має місце поперечний зазор  $z_n$ . Рухомий і нерухомий ножі встановлені на плитах штампу з осьовим зазором  $z_{oc}$  між собою.

Розрахунок параметрів відрізання проводили шляхом моделювання з використанням скінченно-елементної програми DEFORM-3D. Для видавлювання використали циліндричний пруток із сталі 10 діаметром  $d=10$  мм і довжиною 30 мм. Довжина заготовки, що відрізається, складала  $l=10$  мм, а швидкість деформування –  $V_0=5$  мм/сек. Величина зазору  $z_n=0,5$  мм, а відрізання проводили з різними осьовими зазорами:  $z_n=0,0; 0,25; 0,5$  і  $0,75$  мм. Розміри ножів  $d_n=10,5$  мм,  $c=2$  мм.

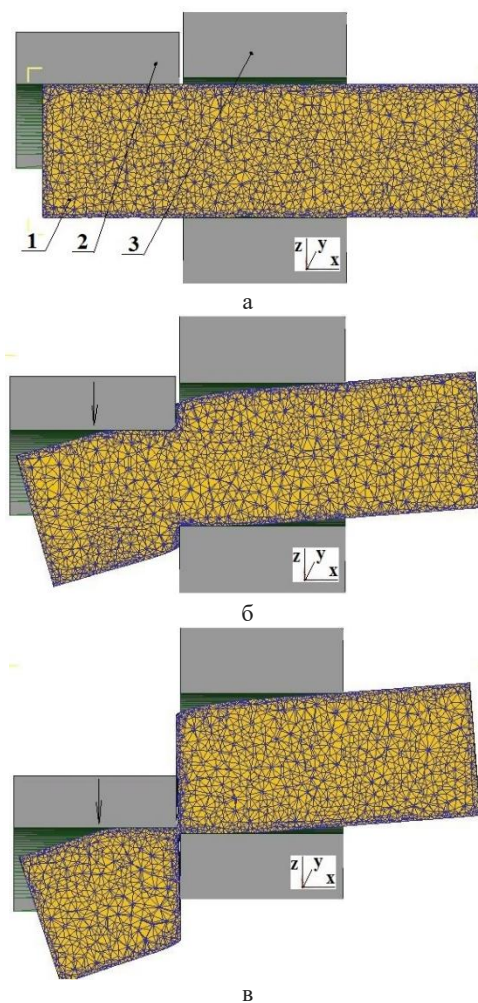


Рис. 2 – Розрахункові схеми в розрізі: а – на початку відрізання, б – при максимальному зусиллі відрізання, в – в момент відокремлення заготовки

Розрахункові схеми в розрізі для зазору  $z_n=0,25$  мм наведені на рис. 2. Тут і в подальшому показаний розріз в напрямку вісі  $z$  по середині прутка. На рис. 2, а показана схема на початку відрізання. Пруток встановлений в рухомому ножі 2 через нерухомий ніж 3. На частину Положення при максимальному зусиллі відрізання зображено на рис. 2б, а в момент відокремлення заготовки – на рис. 2, в.



**Обговорення результатів.** В процесі відрізання ножі витримують безпосередньо зусилля відрізання  $P_B$ , яке виникає в напрямку переміщення рухомого ножа (в напрямку вісі  $z$ , та розпираюче зусилля  $P_P$ , діє в поперечному напрямку (в напрямку вісі  $x$ ). Силові режими відрізання показані на рис. 3. Для прикладу, на рис. 3а, представлені залежності цих зусиль, яке витримує рухомий ніж на протязі відрізання, від його переміщення ( $z_n=0,0$ ). Зусилля спочатку зростають і досягають максимальних значень  $P_B=23$  кН і  $P_P=6,7$  кН при переміщенні рухомого ножа 2,9 мм. Далі зусилля зменшуються до повного відокремлення заготовки від прутка. Найбільша величина розпираючого зусилля складає  $P_P=0,34P_B$ , що відповідає даним джерела [1].

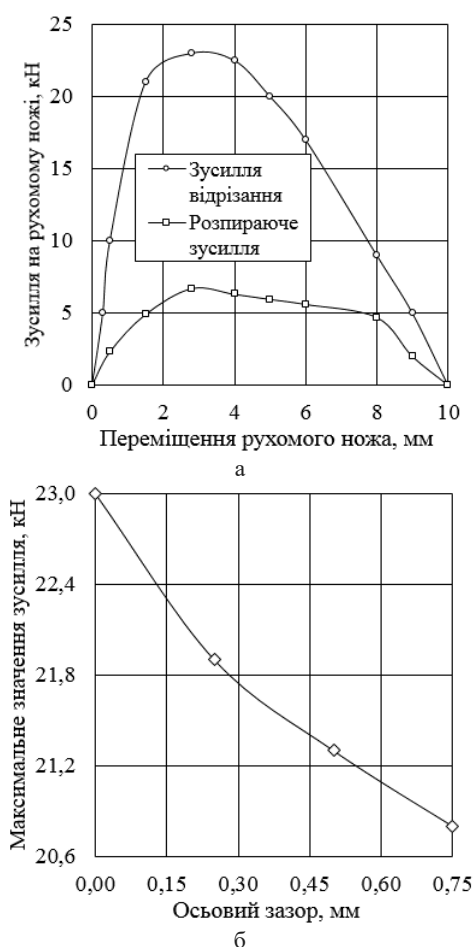


Рис. 3 – Силові режими відрізання: а– залежності зусиль, яке витримує рухомий ніж при відрізанні, від його переміщення, б – залежність максимального зусилля відрізання від величини осьового зазору

Залежність максимального зусилля відрізання від величини осьового зазору зображена на рис. 3, б. Збільшення осьового зазору приводить до зменшення зусилля відрізання.

Моделюванням встановлені кінцеві форми і розміри заготовок. Для розглянутих величин зазорів на отриманих заготовках мають місце ум'ятини і утяжини на поверхні та викривлення на торцях (див. рис. 2в). Для пояснення причин таких дефектів був визначений

напружено-деформований стан в осередку деформації при відрізанні для максимального зусилля відрізання та на початку відокремлення заготовки від прутка. Ум'ятини утворюються завдяки великим питомим зусиллям, що виникають на поверхні контакту рухомого ножа з частиною прутка, що відрізається, та на поверхні нерухомого ножа і самим прутком. Питомі зусилля можна оцінити по розподілу напружень в напрямку вісі  $z$ , яка співпадає з переміщенням рухомого ножа. На рис. 4 приведений розподіл напружень  $\sigma_z$  при максимальному значенні зусилля відрізання із зазором  $z_{oc}=0,0$ . На поверхнях контакту між ножами і частиною прутка, що відрізається, та самим прутком виникають стискаючі напруження величиною  $\sigma_z=-720$  МПа. Вказана величина досягає  $\sigma_z=3,6\sigma_{0,2}$  ( $\sigma_{0,2}$  – умовна межа текучості матеріалу прутка). Необхідно відмітити, що при відсутності поперечного зазору у прутку в області біля рухомого ножа виникають розтягувальні напруження величиною  $\sigma_z=420$  МПа. Величина  $\sigma_z=96$  МПа отримана у частині прутка, що відрізається в зоні поруч з нерухомим ножом. Розтягувальні напруження  $\sigma_z$  разом з напруженнями  $\sigma_x$  є причиною утворення утяжин на отриманих заготовках.

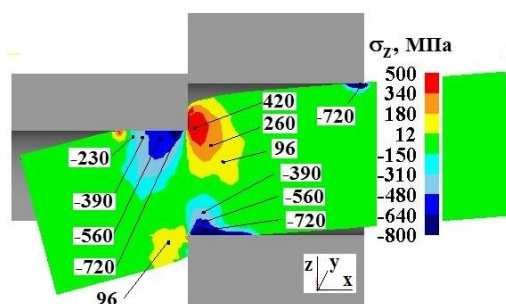


Рис. 4 – Розподіл напружень  $\sigma_z$  при максимальному зусиллі відрізання із  $z_{oc}=0,0$  мм

Розподіл напружень  $\sigma_x$  для наведеного випадку наведений на рис. 5. У самому прутку, в області біля рухомого ножа, виникають розтягувальні напруження величиною  $\sigma_x=350$  МПа. Зі збільшенням осьового зазору зростає величина утяжини в області торців отриманої заготовки.

Причиною утворення викривлень на торцях заготовки є великі розтягувальні напруження  $\sigma_x$ , які виникають наприкінці процесу відрізання. На рис. 6 наведені розподіли напружень  $\sigma_x$  наприкінці відрізання заготовок із зазорами  $z_{oc}=0,25$  мм і  $z_{oc}=0,75$  мм.



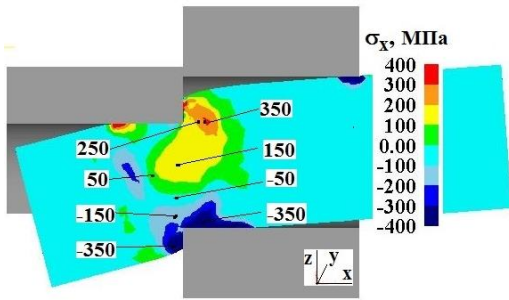


Рис. 5 – Розподіл напружень  $\sigma_x$  при максимальному зусиллі відрізання із  $z_{oc}=0,0$

При відрізаннях із  $z_{oc}=0,25$  мм в осередку деформації в частині прутка, що відокремлюється та в самому прутку виникають напруження у межах  $\sigma_x=105\div 445$  МПа (рис. 6, а). Вказані напруження приводять до незначного відставання металу від рухомого та нерухомого ножів та утворення дефекту у вигляді викривлення. Збільшення величини зазору  $z_{oc}$  при відрізаннях дає зростання розтягувальних напружень  $\sigma_x$  і величини викривлення.

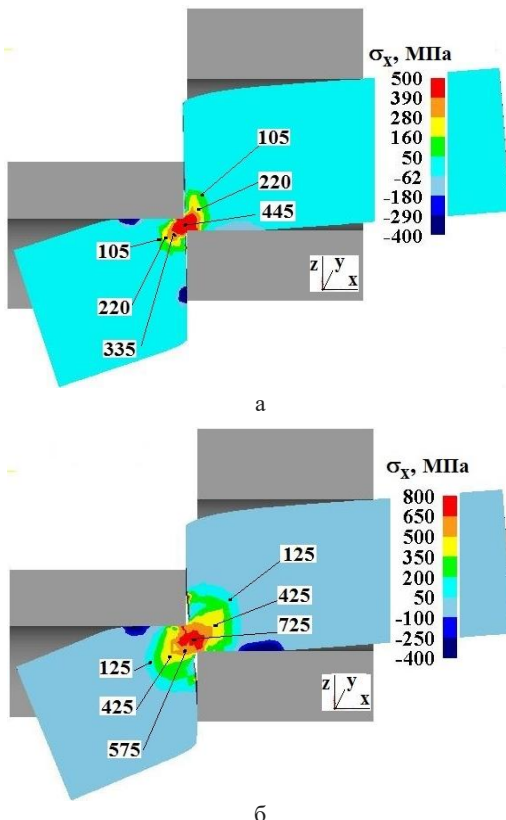


Рис. 6 – Розподіл напружень  $\sigma_x$  наприкінці відрізання: а – із зазором  $z_{oc}=0,25$  мм, б – із зазором  $z_{oc}=0,75$  мм

При відрізаннях із зазором  $z_{oc}=0,75$  мм в осередку деформації вже виникають напруження у межах  $\sigma_x=125\div 725$  МПа, величина викривлення по висоті і ширині збільшується в два рази.

По даних С.С. Соловцова [1] величина осевого зазору впливає на напрямки розвитку тріщин в осередку деформації при відрізаннях. Якщо зазор  $z_{oc}$  вибраний неправильно, то ці напрямки не співпадають і торці на отриманих заготовках можуть бути ступінчастими. Напрямки розвитку тріщин від рухомого ножа і від нерухомого ножа в осередку деформації при відрізаннях можна оцінити по розподілу інтенсивності напружень  $\sigma_i$ . На рис. 7 зображений розподіл напружень  $\sigma_i$ , який виникає при максимальному зусиллі, при відрізаннях із зазором  $z_{oc}=0,5$  мм.

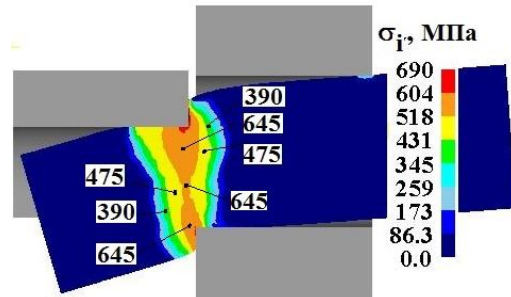


Рис. 7 – Розподіл напружень  $\sigma_i$  при максимальному зусиллі відрізання із зазором  $z_{oc}=0,5$  мм

У здеформованому прутку біля торців ножів тримані області з величинами напружень  $\sigma_i=645$  МПа. Така величина напружень  $\sigma_i$  виникає і по середині прутка. Тому при цьому зазорі співпадіння напрямки розвитку тріщин співпадають. На кінець, величину осередку деформації при відрізаннях можна визначити по розподілу інтенсивності деформацій  $\epsilon_i$  наприкінці відрізання. Такий розподіл показаний на рис. 8 для відрізання із  $z_{oc}=0,5$  мм.

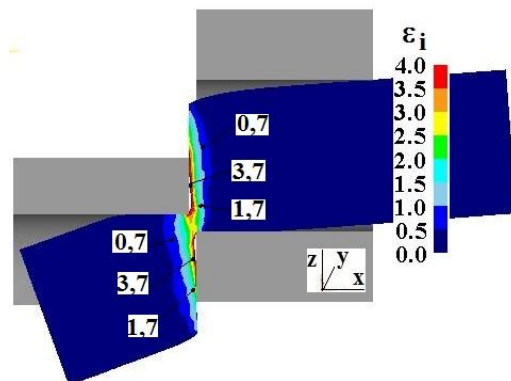


Рис. 8 – Розподіл деформацій  $\epsilon_i$  наприкінці відрізання із зазором  $z_{oc}=0,5$  мм

У самому прутку, в області торця, інтенсивність деформацій досягає величини  $\epsilon_i=3,7$  з подальшим зменшенням до  $\epsilon_i=3,7$  на віддалі 1,5 мм від торця та до  $\epsilon_i=0,0$  на віддалі 3 мм. Аналогічний розподіл цих деформацій виникає у частині прутка, що відрізається. Необхідно відмітити, що при даній величині зазору має місце незначне викривлення на торці прутка і частині прутка, що відрізається. З урахуванням величини

зусилля відрізання (див. рис. 3), величину  $z_{oc}=0,5$  мм можна вважати раціональною для отримання заготовок із  $l/d=1$  із маловуглецевої сталі.

**Висновки.** Методом скінченних елементів визначений вплив осевого зазору між рухомим та нерухомим ножами при неповноті відкритому відрізання заготовок із круглого прутка зсувом у штампі. Встановлені силові режими відрізання та питомі зусилля на ножах. Виявлені кінцеві форма і розміри отриманих заготовок. Встановлені причини появи умятин, утяжин та викривлення торців на отриманих заготовках.

#### Список літератури

1. Соловцов С.С. Безотходная разрезка сортового проката в штампах / С.С. Соловцов – М.: Машиностроение, 1985. – 176 с.
2. Роганов Л.Л. Разделение сортового проката больших поперечных сечений способом отрезки сдвигом / Л.Л. Роганов, С.Г. Карнаух, Н.В. Чоста // Обработка материалов давлением. – Краматорск: ДГМА, 2010. №2(23). – С. 131–141.
3. Маркин Н.И. Технологические параметры отрезки коротких точных заготовок в штампах в состоянии всестороннего сжатия / Н.И. Маркин, Э.А. Кравцова, С.А. Москвитин и др. // – Заготовительное производство в машиностроении: Москва, 2010. №6. – С. 21–24.
4. Алифанов А.В. Оптимизация процесса рубки в штампах точных заготовок из прутка / А.В. Алифанов, А.М. Милокова, Л.Л. Сотник // Сб. статей XIII Межд. научн.-практ. конф. «Высокие технологии, экономика, промышленность». Т. 2, Часть 2: Фундаментальные и прикладные исследования, разработка и применение высоких технологий в промышленности и экономике. – Санкт-Петербург: Изд-во Политехн, ун-та, 2012. – С. 18–21.
5. Алифанов А.В. Полузакрытый штамп для рубки сколом высокоточных прутковых заготовок / А.В. Алифанов, Л.Л. Сотник // Весник БарГУ. Серия: Физико-технические науки. – Барановичи: ГУ, 2013, № 1. – С. 38–43.
6. Карнаух С.Г. Применение критериев разрушения материалов для выбора способа разделения сортового проката / С.Г. Карнаух, М.А. Винников, Д.С. Карнаух, // – Металлообработка: Санкт-Петербург. 2011. №1(61). – С. 35–41.
7. Дьямантопуло К.К. Качество реза и параметры точности заготовок при отрезке в штампах вращающимся инструментом / К.К. Дьямантопуло // Известия Московского ГТУ «МАМИ». Т2, 2013. – С. 271–276.
8. Роганов Л.Л. Перспективные направления развития оборудования для безотходного разделения сортового проката на мерные заготовки / Л.Л. Роганов, Н.В. Чоста // Обработка материалов давлением. – Краматорск: ДГМА, 2013. №3(36). – С. 207–212.
9. Роганов Л.Л. Разработка нового типа кузнечно-штамповочного оборудования для разделительных операций / Л.Л. Роганов, С.Г. Карнаух, Н.В. Чоста // – Металлообработка: Санкт-Петербург. 2010. №6(60). – С. 28–34.

10. Songa J.L. Numerical simulation and experiments of precision bar cutting based on high speed and restrained stat / J.L. Songa, Y.T. Lia, Z.Q. Liua // – Materials Science and Engineering, 2009, Vol. 499. – Pp. 225–229.
11. Ishiguro T. Deformation analysis of shearing process using results / T. Ishiguro, Y. Yoshida, N. Yukawa // Materials Transactions.– The Japan Institute of Metals, 2009. – Vol. 50, No. 7. – Pp. 1671–1677.

#### References (transliterated)

1. Solovtsov S.S. Bezotkhodnaia razrezka sortovogo prokata v shtampakh / S.S. Solovtsov // – Moscow : Mashynostroenye, 1985. – 176 p.
2. Rohanov L.L. Razdelenye sortovogo prokata bolshykh poperechnykh secheniy sposobom otrezky sdyvhom / L.L. Rohanov, S.H. Karnaukh, N.V. Chosta // Obrabotka materialov davleniem. – Kramatorsk: DHMA, 2010. No.2(23). – Pp. 131–141.
3. Markyn N.Y. Tekhnolohycheskye parametry otrezky korotkykh tochnykh zahotovok v shtampakh v sostoianyy vsstoronneho szhatyia / N.Y. Markyn, E.A. Kravtsova, S.A. Moskvityn y dr. // – Zahotovytelnoe proyzvodstvo v mashynostroeny: Moscow, 2010. No.6. – Pp. 21–24.
4. Alyfanov A.V. Optymyzatsiya protsessa rubky v shtampakh tochnykh zahotovok yz prutka / A.V. Alyfanov, A.M. Myliukova, L.L. Sotnyk // Sb. statei KhIII Mezhd. nauchn.-prakt. konf. «Vysokye tekhnolohyy, ekonomyka, promyshlennost». Vol. 2, Chast 2: Fundamentalnye y prykladnye yssledovanya, razrabotka y prymenenye vysokykh tekhnolohyi v promyshlennosti y ekonomyke. – Sankt-Peterburh: Yzd-vo Polytekh, un-ta, 2012. – Pp. 18–21.
5. Alyfanov A.V. Poluzakrytyi shtamp dlia rubky skolom vysokotochnykh prutkovykh zahotovok / A.V. Alyfanov, L.L. Sotnyk // Vesnyk BarHU. Seriya: Fyzyko-tekhnicheskye nauky. – Baranovychny: HU, 2013, No.1. – Pp. 38–43.
6. Karnaukh S.H. Prymenenye kryteryev razrusheniya materialov dlia vybora sposoba razdeleniya sortovogo prokata / S.H. Karnaukh, M.A. Vynnykov, D.S. Karnaukh, // – Metalloobrabotka: Sankt-Peterburh, 2011. No.1(61). – Pp. 35–41.
7. Dyamantopulo K.K. Kachestvo reza y parametry tochnosti zahotovok pry otrezke v shtampakh vrashchayushchysia instrumentom / K.K. Dyamantopulo // Yzvestiya Moskovskoho HTU «MAMY». Vol.2, 2013. – Pp. 271–276.
8. Rohanov L.L. Perspektivnye napravleniya razvytiya oborudovaniya dlia bezotkhodnoho razdeleniya sortovogo prokat na mernye zahotovky / L.L. Rohanov, N.V. Chosta // Obrabotka materialov davleniem. – Kramatorsk: DHMA, 2013. No.3(36). – Pp. 207–212.
9. Rohanov L.L. Razrabotka novoho typu kuznechno-shtampovochnoho oborudovaniya dlia razdelytelnykh operatsyi / L.L. Rohanov, S.H. Karnaukh, N.V. Chosta // – Metalloobrabotka: Sankt-Peterburh, 2010. No 6(60). – Pp. 28–34.
10. Songa J.L. Numerical simulation and experiments of precision bar cutting based on high speed and restrained stat / J.L. Songa, Y.T. Lia, Z.Q. Liua // – Materials Science and Engineering, 2009, Vol. 499. – Pp. 225–229.
11. Ishiguro T. Deformation analysis of shearing process using results / T. Ishiguro, Y. Yoshida, N. Yukawa // Materials Transactions.– The Japan Institute of Metals, 2009. – Vol. 50, No. 7. – Pp. 1671–1677.

Надійшла (received) 20.10.2018

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

**Калюжний Володимир Леонідович (Калюжний Владимир Леонидович, Kaljuzhnyi Vladimir)** – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», професор кафедри механіки пластичності матеріалів та ресурсозберігаючих процесів; e-mail: kwl\_2011@ukr.net.

**Касян Дмитро Вікторович (Касян Дмитрий Викторович, Kasian Dmytro)** – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», студент; email: olesboxme@gmail.com

**Русаков Роман Леонідович (Русаков Роман Леонидович, Rusakov Roman)** – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», студент; e-mail: roman-rusakov@hotmail.com

**Ю. В. КОНОВАЛОВ, І. В. КАРМАЗІНА, А. Г. ПРИСЯЖНИЙ, В. В. КУХАР**

### **МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГОСИЛОВИХ РЕЖИМІВ ПРОКАТКИ ЖЕРСТІ ПРИ РІЗНИХ ПАРАМЕТРАХ СТАНІВ ХОЛОДНОЇ ПРОКАТКИ**

Представлений огляд станів холодного прокатування, що використовуються для виробництва жерсті і тонкої жерсті у світі. Світове виробництво жерсті характеризується прагненням до зменшення товщини її сталеві основи, що поряд з високими вимогами до механічних властивостей, якості поверхні і точності геометричних розмірів холоднокатаної смуги, представляє складну виробничу задачу. Зміна технічних параметрів, модернізація складу обладнання цехів з виробництва жерсті, що викликані посиленням вимог до неї, зумовили різноманіття існуючих сьогодні жерстепрокатних станів: безперервних чотирьох-, п'яти- і шестиклітьових; двоклітьових реверсивних. У зв'язку із різноманіттям жерстепрокатних станів, особливостями умов деформації тонкої жерсті, складністю технологічного процесу і теоретичного прогнозування параметрів процесу прокатки, особливо з точки зору універсальності теоретичної моделі, а також нечисленністю існуючих практичних даних обґрунтована необхідність експериментального дослідження. Розроблена методика експериментального дослідження енергосилових режимів прокатки жерсті і тонкої жерсті для різних станів холодної прокатки: п'яти-, шести- і семиклітьового. Розроблені режими деформації, що дозволяють моделювати процес безперервної холодної прокатки жерсті товщиною 0,16 мм та 0,28 мм на п'яти-, шести- і семиклітьовому станах відповідно. Представлена технічна характеристика промислово-лабораторного обладнання, що задіяне в експериментальному дослідженні. Представлені результати дослідження хімічного складу і механічних властивостей початкової заготовки. Експериментальне дослідження енергосилових режимів прокатки жерсті при різних параметрах станів холодної прокатки за розробленою методикою дозволило визначити їх оптимальне поєднання, а також обґрунтувати вибір прокатного обладнання з точки зору енергоефективності процесу прокатки і якості смуги.

**Ключові слова:** тонка жерсть, жерстепрокатний стан, методика експериментального дослідження, режим обтиснення, енергосилові параметри, якість.

**Ю. В. КОНОВАЛОВ, И. В. КАРМАЗИНА, А. Г. ПРИСЯЖНИЙ, В. В. КУХАРЬ**

### **МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ЭНЕРГОСИЛОВЫХ РЕЖИМОВ ПРОКАТКИ ЖЕСТИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ПАРАМЕТРАХ СТАНОВ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ**

Представлен обзор станов холодной прокатки, используемых для производства жести и тонкой жести в мире. Мировое производство жести характеризуется стремлением к уменьшению толщины ее стальной основы. Наряду с высокими требованиями к механическим свойствам, качеству поверхности и точности геометрических размеров холоднокатаной полосы это представляет сложную производственную задачу. Изменение технических параметров, модернизация состава оборудования цехов по производству жести, вызванных усилением требований к ней, обусловили многообразие существующих сегодня жестепрокатных станов: непрерывных четырех-, пяти- и шестиклетьевых; двухклетевых реверсивных. В связи с многообразием жестепрокатных станов, особенностями условий деформации тонкой жести, сложностью технологического процесса и теоретического прогнозирования параметров процесса прокатки, особенно с точки зрения универсальности теоретической модели, а также малочисленностью существующих практических данных обоснована необходимость экспериментального исследования. Разработана методика экспериментального исследования энергосиловых режимов прокатки жести и тонкой жести для различных станов холодной прокатки: пяти-, шести- и семиклетьевого. Разработаны режимы деформации, позволяющие моделировать процесс непрерывной холодной прокатки жести толщиной 0,16 мм и 0,28 мм в пяти-, шести- и семиклетьевом станах соответственно. Представлена техническая характеристика промышленно-лабораторного оборудования, задействованного в экспериментальном исследовании. Представлены результаты исследования химического состава и механических свойств исходной заготовки. Экспериментальное исследование энергосиловых режимов прокатки жести при различных параметрах станов холодной прокатки по разработанной методике позволит определить их оптимальное сочетание, а также обосновать выбор прокатного оборудования с точки зрения энергоэффективности процесса прокатки и качества полосы.

**Ключевые слова:** тонкая жель, жестепрокатный стан, методика экспериментального исследования, режим обжатий, энергосиловые параметры, качество.

**Yu. V. KONOVALOV, I. V. KARMAZINA, А. Н. PRYSIAZHNYI, V. V. KUKHAR**

### **EXPERIMENTAL RESEARCH METHODOLOGY OF ENERGY AND POWER MODES FOR TINPLATE ROLLING AT DIFFERENT PARAMETERS OF COLD ROLLING MILLS**

The review of cold rolling mills used for the production of tinplate and thin tinplate in the world is presented. World tinplate production is characterized by the desire to reduce the thickness of its steel base. Along with the high demands on mechanical properties, surface quality and accuracy of the geometric dimensions of the cold-rolled strip, this is a complex production task. The technical parameters change, the equipment modernization of the shops for the tinplate production, caused by the increasing requirements for it, has caused a variety of existing tinplate rolling mills: continuous five-, six- and seven-stand; reversible two-stand. In connection with the variety of tinplate rolling mills, peculiarities of the deformation conditions of thin tinplate, complexity of the technological process and theoretical prediction of the rolling process parameters, especially in terms of the theoretical model universality, as well as paucity of existing practical data, the necessity of experimental research is substantiated. Experimental research methodology of energy and power modes for tinplate and thin tinplate rolling for different cold rolling mills: five-, six- and seven-stand, was developed. Deformation modes have been developed that allow simulating the process of continuous cold rolling of tinplate with a thickness of 0.16 mm and 0.28 mm in five-, six- and seven-stand mills, respectively. The technical characteristics of industrial-laboratory equipment involved in experimental research are presented. The results of the chemical composition and mechanical properties investigation of the initial billet are presented. Experimental research of energy and power modes for tinplate rolling at different parameters of cold rolling mills using the developed methodology will determine their optimal combination, as well as justify the choice of rolling equipment in terms of energy efficiency of the rolling process and the quality of the strip.

**Keywords:** thin tinplate, tinplate rolling mill, experimental research methodology, deformation mode, energy and strength parameters, quality.

**Вступ.** Світове виробництво жерсті характеризується прагненням до зменшення товщини її сталеві основи [1], що поряд з високими вимогами до механічних властивостей, якості поверхні і точності геометричних розмірів холоднокатаної смуги [2], представляє складну виробничу задачу. Останнім часом ця задача вирішувалася за рахунок дворазової прокатки на прокатно-дресирувальних станах, а також

збільшенням числа клітей безперервних станів. Зміна технічних параметрів, модернізація складу обладнання цехів з виробництва жерсті, що викликані посиленням вимог до неї, зумовили різноманіття існуючих сьогодні жерстепрокатних станів: безперервних чотирьох-, п'яти- і шестиклітьових, двоклітьових реверсивних. З'явилася пропозиція прокатки жерсті на безперервному семиклітьовому стані [3], обґрунтування доцільності застосування такого стану в літературі не виявлено.

Особливість і складність технології виробництва холоднокатаних смуг і жерсті пов'язані з інтенсивним зміцненням, високою швидкістю прокатки. Використання запасу пластичності металу може призводити до утворення тріщин [4], а високі швидкості прокатки викликають резонансні вібрації, що негативно впливають на якість смуги. Ці фактори необхідно враховувати при розробці режимів деформацій і технології виробництва.

Складні умови прокатки жерсті, різноманіття жерстепрокатних станів створюють труднощі як в теоретичному прогнозуванні параметрів процесу прокатки, так і в плані експериментальних досліджень, що пояснює їх нечисленність. Серед останніх потрібно відзначити роботу [5], автори якої експериментально дослідили вплив натягнення на силу прокатки при холодній деформації смуги. У зв'язку з нечисельністю експериментальних досліджень актуальна оцінка достовірності існуючих прийнятих теоретичних рішень шляхом експериментального дослідження параметрів процесу холодної прокатки тонкої жерсті, яке могло б повною мірою врахувати особливості технологічного процесу і відмінність властивостей прокатного обладнання.

**Аналіз стану питання.** Огляд світового виробництва жерсті показав, що сьогодні для прокатки застосовують безперервні шести-, п'яти- і чотирьохклітьові стани; двоклітьові реверсивні стани застосовують тільки для отримання тонкої жерсті. Досвід світової практики показує, чим тонше необхідна товщина жерсті, тим більше число клітей безперервного стану первинної прокатки.

Так, наприклад, комплекс з виробництва холоднокатаного листа і жерсті з мінімальною товщиною 0,1 мм і максимальною шириною 1200 мм компанії «ThyssenKrupp Rasselstein GmbH» [6] включає безперервну лінію травлення гарячекатаного підкату, безперервний шестиклітьовий стан холодної прокатки з максимально можливою швидкістю прокатки 40,2 м/с і річною продуктивністю 1,5 млн. тонн, безперервні лінії очищення, відділення колпакового і безперервного відпалу, двоклітьовий прокатно-дресирувальний стан, лінії хромування, лудіння, лакування, різки та ін. Безперервний шестиклітьовий стан холодної прокатки «ThyssenKrupp Rasselstein GmbH» характеризується наступними параметрами: продуктивність – 1,5 млн. тонн/рік; швидкість прокатки – до 2414 м/хв; товщина г/к підкату – 1,0–4 мм; товщина смуги – 0,1–1,2 мм; ширина смуги – 700–1400 мм; діаметр рулону

– до 2800 мм; маса рулону – до 46 т; діаметр робочих валків – 565–615 мм; діаметр опорних валків – 1300–1450 мм. Прокатно-дресирувальний стан – відповідно: товщина смуги – 0,14–0,55 мм; ширина смуги – 600–1400 мм; швидкість прокатки – до 2200 м/хв; вага рулону – до 35 т; діаметр робочих валків – 505–563 мм; діаметр опорних валків – 1270–1420 мм.

У Тібі (Японія) налагоджено виробництво жерсті розмірами 0,1–1x508–1295 мм. Комплекс для виробництва жерсті представлений агрегатом безперервного травлення гарячекатаного підкату, безперервним п'ятиклітьовим станом холодної прокатки з максимально можливою швидкістю прокатки 46,6 м/с [6], відділеннями колпакового і безперервного відпалу, двоклітьовим прокатно-дресирувальним станом, лініями електролітичного лудіння, лакування, різки та ін. Характеристика безперервного п'ятиклітьового стану холодної прокатки: максимально можлива швидкість прокатки – 2800 м/хв; діаметр робочих валків – 495–610 мм; діаметр опорних валків – 1270–1427 мм.

Подібні комплекси обладнання з виробництва жерсті розташовуються у Південній Кореї та Китаї. Так, на заводі Dongbu Steel в Асан Бей (Південна Корея) прокатують жерсть з мінімальною товщиною сталеві основи до 0,15 мм, шириною 600–1000 мм (при мінімальній товщині) в рулонах масою до 45 тонн на п'ятиклітьовому стані-тандем в комплексі з безперервною лінією травлення і двоклітьовим станом повторної прокатки [7]. П'ятиклітьовий стан-тандем оснащений клітьми сексто, карусельною моталкою, системами додатного і від'ємного вигину робочих і проміжних валків, ESS (Enhanced Shifting System). Стан-тандем заводу Dongbu Steel має високу продуктивність (проектна потужність – 1,34 млн. тонн на рік) і швидкість прокатки (до 1900 м/хв).

Компанія Shougang Group із Західного Пекіна (Китай) має у своєму розпорядженні комплекс обладнання з виробництва жерсті у складі безперервного п'ятиклітьового стану-тандем із лінією травлення (продуктивність установки 1,8 млн. тонн на рік). Стан-тандем також має кліті сексто, що дозволяє отримати на виході мінімальну товщину холоднокатаної смуги – 0,2 мм.

У Тойо (Японія) з 2000 року працює чотирьохклітьовий безперервний стан холодної прокатки, об'єднаний з лінією травлення в травильно-прокатний агрегат [8], з можливістю виробництва жерсті з товщиною до 0,15 мм. Отримання такої малої товщини жерсті на чотирьохклітьовому стані стало можливим за рахунок застосування шестивалкових клітей.

Характеристика безперервного чотирьохклітьового стану холодної прокатки: товщина підкату – 1,6–6,6 мм; діаметр рулону – до 2100 мм; вага рулону – до 25 т; швидкість прокатки – до 1500 м/хв; діаметр валків: 340/490/1300 мм; індивідуальний привід від двигуна змінного струму.

На території СНД значна частка виробництва жерсті доводиться на ПАТ «Магнітогорський металургійний комбінат» (Росія) і АТ «Іспат-Кармет» (Казахстан). ПАТ «Магнітогорський металургійний



комбінат» не має технічної можливості виробництва жерсті подвійною прокаткою і випускає жерсть одноразовою прокаткою за ГОСТ 13345-85 з мінімальною товщиною 0,16 мм і максимальною шириною 910 мм на безперервному п'ятикільтовому стані холодної прокатки 1200 з річною продуктивністю близько 435 000 тонн/рік. Сортамент чорної і білої жерсті, виготовленої на безперервному шестикільтовому стані холодної прокатки 1400 (продуктивність близько 850 000 т/рік) АТ «Іспат-Кармет» (Казахстан), обмежується товщиною 0,18 мм і шириною 936 мм.

В Україні все виробництво жерсті зосереджено на ПАТ «Запоріжсталь». Вітчизняний виробник поки не забезпечує потреби України в жерсті не тільки за обсягами, але і за якістю [9], не випускає жерсть необхідних розмірів. Жерсть на ПАТ «Запоріжсталь» прокатують на обладнанні, виготовленому в 30-х роках минулого століття, яке має недостатню продуктивність, зависокий рівень енерговитрат [10].

Білу жерсть випускають в рулонах при товщині 0,22; 0,25; 0,28 і 0,3 мм. Довгий час її випускали максимальної ширини 321 мм і відвантажували споживачеві в листах. Використання жерсті настільки малої ширини на сучасних консервних лініях неможливе. Лише у 2008 році після реконструкції освоєно технологію виробництва білої жерсті шириною 512 мм, що при розкрої смуг на довжину 712 мм дозволяє отримувати споживачам картки стандартних розмірів. На цей час обсяг виробництва жерсті ПАТ «Запоріжсталь» не перевищує 30–40 тис. т/рік. Тому потреба жерсті в Україні покривається за рахунок імпорту. Проте, Україна

експортує жерсть в Туреччину, Молдову, Єгипет, Сирію, Йорданію та ін. країни.

З'явилася пропозиція застосовувати для прокатки жерсті і семикільтові стани з блочною конструкцією клітей. Поки теоретичного і технологічного обґрунтування цієї пропозиції немає.

Різниця складу обладнання цехів з виробництва жерсті обумовлює розробку режимів деформації, які відповідають конкретному стану, технології виробництва – відповідного компонування і складу устаткування, а також викликає складнощі в теоретичному прогнозуванні параметрів процесу прокатки, особливо з точки зору універсальності теоретичної моделі. Оцінкою достовірності прийнятих теоретичних рішень служать результати експериментальних досліджень. Безліч чинників, що впливають на параметри при прокатці жерсті, пов'язані зі значною складністю процесу, пояснюють труднощі в створенні умов експерименту і, як наслідок, нечисленність існуючих експериментальних досліджень у цьому напрямку.

**Мета роботи.** Розробка методики експериментального дослідження для оцінки енерго-силових параметрів при прокатці жерсті при різних параметрах прокатного обладнання.

**Викладення основного матеріалу.** Методика експериментального дослідження розроблена для промислово-лабораторного стану 300/260x250 Донбаської державної машинобудівної академії, загальний вигляд якого представлений на рис. 1.

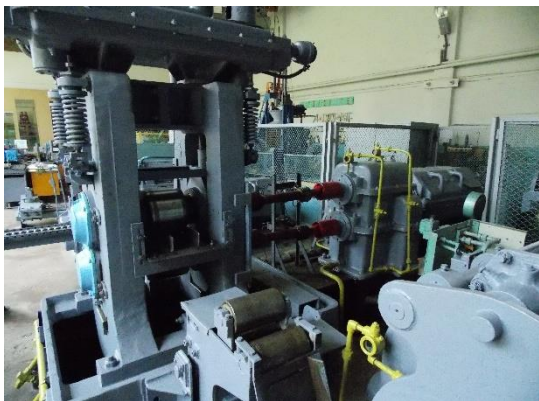


Рис. 1 – Загальний вигляд робочої кліти промислово-лабораторного стану 300/260x250 Донбаської державної машинобудівної академії

Промислово-лабораторний стан включає робочу кліть і її головну лінію, до складу обладнання якої входять: електродвигун постійного струму ДП-72 потужністю 85 кВт; моторна муфта зубчастого типу; комбінований редуктор-шестернева кліть; універсальні шпинделі на тілах кочення з приводом на робочі валки, які характеризуються високою працездатністю при підвищених навантаженнях і кутах перекосу. Робоча кліть стану 300/260x250 має чотирьохвалкове конструктивне виконання з номінальним діаметром і довжиною бочки приводних робочих валків 300 мм і 320 мм, а також з номінальним

діаметром і довжиною бочки опорних валків 260 мм і 250 мм відповідно.

Валковий вузол оснащений механізмом врівноваження і противигину робочих валків, виконаного у вигляді плунжерних гідроциліндрів. Міжвалковий зазор налаштовується на необхідну величину і регулюється в процесі прокатки за допомогою електромеханічного натискного механізму, привід якого здійснюється від двох електродвигунів постійного струму П-41 потужністю по 1,5 кВт через двоступеневий черв'ячний редуктор і передачу гвинт-гайка.

Стан 300/260×200 оснащений месдозами (рис. 2) для фіксування сили прокатки. Вони виконані у вигляді кільцевих пружних елементів з наклеєними на них тензометричними датчиками опору і встановленими безпосередньо під натискні гвинтами.

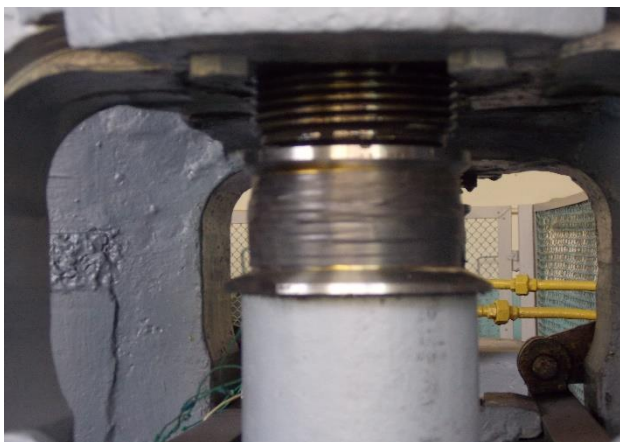


Рис. 2 – Загальний вигляд месдоз промислово-лабораторного стану 300/260×200

Оскільки прокатний стан 300/260×250 однокільтовий і повну імітацію безперервної прокатки смуг здійснити не вдасться, прийнято рішення виготовити зразки для полистної прокатки, що відповідатиме безперервній за однаковим значенням переднього і заднього натягіння. Зразки виготовили з гарячекатаного листа товщиною 2 мм сталі марки 08кп, прокатаного на ШСГП 1700 ПрАТ «ММК ім. Ілліча» та відібраного з середини пачки попередньо промаслених листів, що виключило наявність оксидів і забруднень на його поверхні. Різка листа на смуги шириною 40 мм і довжиною 325 мм проведена гідравлічними гільйотинними ножицями. Вибір розміру зразків обумовлений силовими і конструктивними обмеженнями стану 300/260×250, а також вимогами до розмірів зразків для проведення механічних випробувань. Після різки готові зразки поклалистопами і обернули плівкою на період зберігання.

Дослідження хімічного складу сталі початкових зразків проведені на обладнанні центральної лабораторії ПрАТ «МК «Азовсталь». Дослідження межі плинності початкових зразків проведено в умовах центральної лабораторії ПрАТ «ММК ім. Ілліча» з використанням обладнання: ZDM (zyklische dehnungmaschine) (рис. 3) – для визначення межі плинності і міцності, а також прилад типу ТКС-1 (твердомір з конусом Суперроквелл) (рис. 4) – для визначення твердості. Прилад ТКС-1 настільного типу призначений для визначення поверхневої твердості металів за методом вдавнення алмазного конуса або сталевий кульки під дією заданого навантаження протягом певного часу.

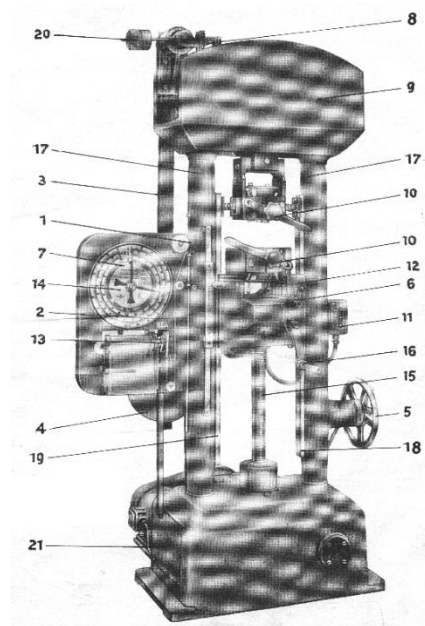


Рис. 3 – ZDM: 1 – шестеренна передача реєструючого приладу для запису діаграми «навантаження-деформація»; 2 – розсувна лінійка для вимірювання подовження; 3 – силозбуджуючий важіль; 4 – додаткові гири з гайками з накаткою; 5 – маховичок варіатора; 6 – ручка перемикання (головного, швидкодіючого і ручного приводного механізму); 7 – циферблат силосимірувача; 8 – олійні гальма; 9 – поперечна балка; 10 – головка швидкозатискного пристрою (кіно-роликів затискачі); 11 – кнопкова станція; 12 – повзун; 13 – ролик для приводної стрічки; 14 – стрілка з примусовим рухом; 15 – шпindel; 16 – річний курбель ручного приводного механізму; 17 – стійки станини; 18 – направляючі шини; 19 – цоколь – нижня частина станини; 20 – регульована гиря; 21 – захист, що запобігає випадковому випригуванню силосимірувального механізму з правильного положення

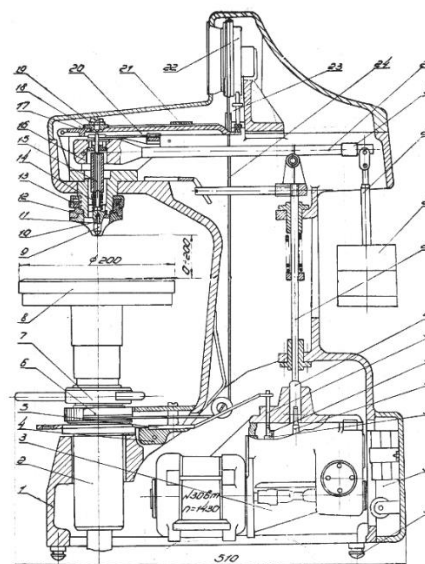


Рис. 4 – Прилад для визначення твердості типу ТКС-1: 1 – корпус; 2 – механізм підйому; 3 – привід приладу; 4 – клавіша; 5 – подовжувач; 6 – барабан; 7 – маховик; 8 – стіл; 9 – оправка; 10 – гвинт; 11 – обмежувач; 12 – направляюча втулка; 13 – обойма; 14 – пружина; 15 – шпindel; 16 – важільний блок; 17 – плавача підвіска; 18 – планка; 19 – гвинт; 20 – вимірювальний важіль; 21 – грузик; 22 – індикатор; 23 – накінецьник; 24 – трос; 25 – вантажний важіль; 26 – підвіска; 27 – вантажі; 28 – шток; 29 – штовхач; 30 – засувка; 31 – собачка; 32 – кулачок; 33 – храпове колесо; 34 – панель; 35 – опора; 36 – вантаж

Результати дослідження початкових зразків представлені в табл. 1.

Розроблені режими деформації (табл. 2–13), що дозволяють моделювати процес безперервної холодної прокатки жерсті товщиною 0,16 мм та 0,28 мм на п'яти-, шести- і семиклітьовому станах відповідно. Режими деформації розроблені виходячи з досвіду експлуатації сучасних безперервних станів холодної прокатки жерсті і з умови рівномірного завантаження клітей за силою і моментом прокатки, а також відповідно до рекомендацій [11], згідно з якими велике значення має вибір обтиснень для першої і останньої кліті стану. Величина обтиску в першій кліті сприяє зниженню початкової різнотовщинності підкату і його

поверхневих дефектів. При незначному задньому натяжінні (практично при його відсутності, як у випадку експерименту), щоб уникнути зсуву смуги по осі прокатки обтиснення в першій кліті рекомендується встановлювати в межах 30 %. Величина обтиску в останній кліті безперервного стану впливає на ефективність роботи систем автоматичного регулювання товщини, натяжіння, форми смуги і повинна бути максимально можливою.

Характер розподілення обтиснень за клітьями безперервного стану у режимах деформації, представлених в табл. 2–7, відповідає схемі, що зазвичай використовується при прокатці тонкої жерсті [12].

Таблиця 1 – Хімічний склад та механічні характеристики початкової заготовки

Масова частка елементів, %								$\sigma_T$ , МПа	HRB	$\delta$ , %
C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu			
0,05	<0,01	0,33	0,02	0,016	0,013	0,03	0,04	285	49	27

Таблиця 2 – Режим обтиснень загальноприйнятого характеру для моделювання процесу прокатки жерсті товщиною 0,16 мм на п'ятиклітьовому стані

Параметр	Номер пропуску				
	1	2	3	4	5
$h_{i-1}$ , мм	2,00	1,44	0,84	0,48	0,28
$h_i$ , мм	1,44	0,84	0,48	0,28	0,16
$\varepsilon$ , %	28,00	42,00	42,00	42,00	43,00
$\sum \varepsilon$ , %	28,00	58,00	76,00	86,00	92,00

Таблиця 3 – Режим обтиснень загальноприйнятого характеру для моделювання процесу прокатки жерсті товщиною 0,16 мм на шестиклітьовому стані

Параметр	Номер пропуску					
	1	2	3	4	5	6
$h_{i-1}$ , мм	2,00	1,40	0,91	0,59	0,38	0,25
$h_i$ , мм	1,40	0,91	0,59	0,38	0,25	0,16
$\varepsilon$ , %	30,00	35,00	35,00	35,00	35,00	36,00
$\sum \varepsilon$ , %	30,00	55,00	70,00	81,00	88,00	92,00

Таблиця 4 – Режим обтиснень загальноприйнятого характеру для моделювання процесу прокатки жерсті товщиною 0,16 мм на семиклітьовому стані

Параметр	Номер пропуску						
	1	2	3	4	5	6	7
$h_{i-1}$ , мм	2,00	1,66	1,13	0,77	0,52	0,35	0,24
$h_i$ , мм	1,66	1,13	0,77	0,52	0,35	0,24	0,16
$\varepsilon$ , %	17,00	32,00	32,00	32,00	32,00	32,00	34,00
$\sum \varepsilon$ , %	17,00	44,00	62,00	74,00	82,00	88,00	92,00

Таблиця 5 – Режим обтиснень загальноприйнятого характеру для моделювання процесу прокатки жерсті товщиною 0,28 мм на п'ятиклітьовому стані

Параметр	Номер пропуску				
	1	2	3	4	5
$h_{i-1}$ , мм	2,00	1,42	0,95	0,64	0,43
$h_i$ , мм	1,42	0,95	0,64	0,43	0,28
$\varepsilon$ , %	29,00	33,00	33,00	33,00	34,00
$\sum \varepsilon$ , %	29,00	52,00	68,00	79,00	86,00

Таблиця 6 – Режим обтиснень загальноприйнятого характеру для моделювання процесу прокатки жерсті товщиною 0,28 мм на шестиклітьовому стані

Параметр	Номер пропуску					
	1	2	3	4	5	6
$h_{i-1}$ , мм	2,00	1,57	1,12	0,79	0,56	0,40
$h_i$ , мм	1,57	1,12	0,79	0,56	0,40	0,28
$\varepsilon$ , %	21,00	29,00	29,00	29,00	29,00	30,00
$\sum \varepsilon$ , %	21,00	44,00	60,00	72,00	80,00	86,00

Таблиця 7 – Режим обтиснень загальноприйнятого характеру для моделювання процесу прокатки жерсті товщиною 0,28 мм на семиклітьовому стані

Параметр	Номер пропуску						
	1	2	3	4	5	6	7
$h_{i-1}$ , мм	2,00	1,59	1,19	0,90	0,67	0,50	0,38
$h_i$ , мм	1,59	1,19	0,90	0,67	0,50	0,38	0,28
$\varepsilon$ , %	20,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	26,00
$\sum \varepsilon$ , %	20,00	40,00	55,00	66,00	75,00	81,00	86,00

Розподілення обтиснень за клітьями безперервного стану у режимах деформації, представлених в табл. 8–13, має зростаючий характер, коли обтиск збільшується від першої кліті безперервного стану до останньої, що забезпечує прокатку підвищеної товщини смуги, яка володіє великим запасом пластичності. Обтиснення, встановлені для останньої кліті розроблених режимів, практично дорівнюють обтисненню попередньої кліті, що не відповідає загальноприйнятим рекомендаціям, але пояснюється тим, що за умови прокатки вже наклепаних смуг на конкретній кліті лабораторно-промислового стану сила прокатки стала б перевищувати допустиме значення.

Таблиця 8 – Режим обтиснень зростаючого характеру для моделювання процесу прокатки жерсті товщиною 0,16 мм на п'ятиклітьовому стані

Параметр	Номер пропуску				
	1	2	3	4	5
$h_{i-1}$ , мм	2,00	1,40	0,91	0,59	0,33
$h_i$ , мм	1,4	0,91	0,59	0,33	0,16
$\varepsilon$ , %	30,00	35,00	35,00	45,00	50,00
$\sum \varepsilon$ , %	30,00	55,00	70,00	84,00	92,00

Таблиця 9 – Режим обтиснень зростаючого характеру для моделювання процесу прокатки жерсті товщиною 0,16 мм на шестиклітьовому стані

Параметр	Номер пропуску					
	1	2	3	4	5	6
$h_{i-1}$ , мм	2,00	1,80	1,40	1,00	0,60	0,32
$h_i$ , мм	1,80	1,40	1,00	0,60	0,32	0,16
$\varepsilon$ , %	10,00	22,00	29,00	40,00	47,00	50,00
$\Sigma\varepsilon$ , %	10,00	30,00	50,00	70,00	84,00	92,00

Таблиця 10 – Режим обтиснень зростаючого характеру для моделювання процесу прокатки жерсті товщиною 0,16 мм на семиклітьовому стані

Параметр	Номер пропуску						
	1	2	3	4	5	6	7
$h_{i-1}$ , мм	2,00	1,60	1,28	1,00	0,72	0,47	0,27
$h_i$ , мм	1,60	1,28	1,00	0,72	0,47	0,27	0,16
$\varepsilon$ , %	20,00	21,00	22,00	28,00	35,00	40,00	42,00
$\Sigma\varepsilon$ , %	20,00	36,00	50,00	64,00	77,00	86,00	92,00

Таблиця 11 – Режим обтиснень зростаючого характеру для моделювання процесу прокатки жерсті товщиною 0,28 мм на п'ятиклітьовому стані

Параметр	Номер пропуску				
	1	2	3	4	5
$h_{i-1}$ , мм	2,00	1,54	1,12	0,76	0,48
$h_i$ , мм	1,54	1,12	0,76	0,48	0,28
$\varepsilon$ , %	23,00	27,00	32,00	37,00	41,80
$\Sigma\varepsilon$ , %	23,00	44,00	62,00	76,00	86,00

Таблиця 12 – Режим обтиснень зростаючого характеру для моделювання процесу прокатки жерсті товщиною 0,28 мм на шестиклітьовому стані

Параметр	Номер пропуску					
	1	2	3	4	5	6
$h_{i-1}$ , мм	2,00	1,60	1,22	0,88	0,61	0,42
$h_i$ , мм	1,60	1,22	0,88	0,61	0,42	0,28
$\varepsilon$ , %	20,00	24,00	28,00	30,00	32,00	33,00
$\Sigma\varepsilon$ , %	20,00	39,00	56,00	69,00	79,00	86,00

Таблиця 13 – Режим обтиснень зростаючого характеру для моделювання процесу прокатки жерсті товщиною 0,28 мм на семиклітьовому стані

Параметр	Номер пропуску						
	1	2	3	4	5	6	7
$h_{i-1}$ , мм	2,00	1,60	1,25	0,96	0,72	0,53	0,39
$h_i$ , мм	1,60	1,25	0,96	0,72	0,53	0,39	0,28
$\varepsilon$ , %	20,00	22,00	23,00	25,00	26,00	27,00	28,00
$\Sigma\varepsilon$ , %	20,00	38,00	52,00	64,00	73,00	81,00	86,00

Для вищезазначених режимів обтиснень розроблені схеми, що імітують процес прокатки жерсті у п'яти-, шести- і семиклітьовому безперервному стані. Схеми прокатки, відбору і нумерації зразків представлені у роботі [13].

У якості мастила використовується пальмова олія, яка подається на смугу перед завданням у валки стану.

Запис поточних у часі значень сили прокатки проводиться за допомогою світлопроменевих осцилографів Н-145, крім яких до складу відповідних вимірювальних ланцюгів входить джерело живлення постійного струму АГАТ і тензOMETричний підсилювач ТОПАЗ-3-01. Крім того, запис величини сили прокатки проводиться і за допомогою ЕОМ з

вбудованим аналого-цифровим перетворювачем АЦП-ADC16-32, що забезпечує можливість вимірювання за шістнадцятьма диференційованими каналами. Вхідний сигнал у цьому випадку оцифровується перетворювачем з частотою до 100 кГц з можливістю посилення в діапазоні 1...1000. Тарировка вимірювачів сили прокатки проводиться на пресі шляхом його навантаження силами відомої величини і отримання відповідних осцилограм.

**Висновки.** Різниця складу обладнання цехів з виробництва жерсті, параметрів жерстепрокатних танів, особливості умов деформації тонкої жерсті пояснюють складність теоретичного прогнозування та експериментального визначення параметрів процесу прокатки. Обґрунтована необхідність проведення експериментального дослідження з визначення енергосилових параметрів при прокатці жерсті при різних параметрах станів холодної прокатки.

Розроблена методика експериментального дослідження енергосилових параметрів при прокатці жерсті і тонкої жерсті для різних станів: п'яти-, шести- і семиклітьового. Експериментальне дослідження енергосилових параметрів при прокатці жерсті при різних параметрах станів холодної прокатки за розробленою методикою дозволить визначити їх оптимальне поєднання, а також обґрунтувати вибір прокатного обладнання з точки зору енергоефективності процесу прокатки і якості смуги.

#### Список літератури

1. Коновалов Ю. В., Присяжний А. Г., Кармазина И. В. Анализ тенденций мирового производства жести. *Металл и литье Украины*, 2015. № 1. С. 3–6.
2. Василів Я. Д., Путноки А. Ю., Симененко О. В. Современный стан холодной прокатки для комбината «Запорожсталь». *Металлургическая и горнорудная промышленность*, 2007. № 1. С. 37–40.
3. Капланов В. И., Присяжний А. Г., Лепорська Н. В., Капканова О. В., Шемякин О. В., Васекін А. В. Пат. 201005396, Україна. *Багатоклітьовий безперервний стан холодної прокатування тонких штаб та жерсті*. 2010.
4. Федоринов В. А., Спасская А. М., Закорвашевич Н. А., Коряченко Н. А. Математическое моделирование степени использования запаса пластичности на кромках холоднокатанных лент и полос. *Обработка материалов давлением*, 2011. № 1. С. 81–84.
5. Василів Я. Д., Самокиш Д. Н., Замогилин Р. А., Железнов Д. В. Экспериментальное исследование влияния натяжения на силу прокатки и кривые пластичности при холодной прокатке. *Обработка материалов давлением*, 2017. № 1 (44). С. 192–198.
6. Tsujimoto M., Kaneko T., Yamada Y. et al. Technological development of high speed (2800 mpm) cold rolling. *CAMP-ISIJ*, 2002. № 15. С. 317–320.
7. Lee Y. H., Roh B. I., Chun W. I., Aeberli K., Pohl H. J. Two-stand temper and double reduction mill at Dongbu Steel, Asan Bay Works. *Revue de Metallurgie*, 2000. № 97 (11). С. 1391–1398.
8. Hiraiwa A., Nouchi S., Toshihori M. et al. New tandem cold rolling mill at Toyo Works. *CAMP-ISIJ*, 2002. № 15. С. 321–323.
9. Лагода Т., Деревянко Е. Жизнь моя – жестианка 2003. *Бизнес*, 2003. № 34. С. 110–113.
10. Василів Я. Д., Путноки А. Ю., Симененко А. В. Концепция развития прокатного производства комбината «Запорожсталь». *Металлургическая и горнорудная промышленность*, 2006. № 2. С. 48–51.
11. Пименов А. Ф., Сосковец О. Н., Трайно А. И., Трайно В. Л., Нетесов Н. П. *Холодная прокатка и отделка жести*. Москва: Металлургия, 1990. 208 с.
12. Василів Я. Д. *Инженерные модели и алгоритмы расчёта параметров холодной прокатки*. Москва: Металлургия, 1995. 368 с.
13. Коновалов Ю. В., Кармазина И. В. Нерешенные задачи при организации производства жести. *Обработка материалов давлением*, 2015. № 1 (40). С. 163–168.



## References (transliterated)

1. Konovalov Yu. V., Prisyazhnyj A. G., Karmazina I. V. Analiz tendencij mirovogo proizvodstva zhesti [Analysis of trends development tin world production]. *Metall i lit'yo Ukrainy* [Metal and casting of Ukraine], 2015. no 1. pp. 3–6.
2. Vasilyov Ya. D., Putnoki A. Yu., Simenenko O. V. Sovremennyj stan holodnoj prokatki dlya kombinata «Zaporozhstal» [Modern cold rolling mill for Zaporizhstal]. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'* [Metallurgical and mining industry], 2007. no 1. pp. 37–40.
3. Kaplanov V. I., Prisyazhnyj A. G., Lepors'ka N. V., Kaplanova O. V., Shemyakin O. V., Vasekin A. V. Pat. 201005396, Ukraina. *Bagatoklit'ovij bezperernij stan holodnogo prokatuvannya tonkih shtab ta zhersti* [Multistand continuous cold rolling mill of thin strips and tinplate]. 2010.
4. Fedorin V. A., Spasskaya A. M., Zakorvashevich N. A., Koryachenko N. A. Matematicheskoe modelirovanie stepeni ispol'zovaniya zapasa plastichnosti na kromkah holodnokatanyh lent i polos [Mathematical modeling of efficiency of plasticity margin at the edges of cold-rolled belts and strips]. *Obrabotka materialov davleniem* [Materials working by pressure], 2011. No 1. pp. 81–84.
5. Vasilyov Ya. D., Samokish D. N., Zamogil'nyj R. A., Zheleznov D. V. Eksperimental'noe issledovanie vliyaniya natyazheniya na silu prokatki i krivye plastichnosti pri holodnoj prokatke [Experimental study of the effect of tension on rolling force curves and plasticity in cold rolling]. *Obrabotka materialov davleniem* [Materials working by pressure], 2017. No 1 (44). pp. 192–198.
6. Tsujimoto M., Kaneko T., Yamada Y. et al. Technological development of high speed (2800 mpm) cold rolling. *CAMP-ISIJ*, 2002. No 15. pp. 317–320.
7. Lee Y. H., Roh B. I., Chun W. I., Aeberli K., Pohl H. J. Two-stand temper and double reduction mill at Dongbu Steel, Asan Bay Works. *Revue de Métallurgie*, 2000. No 97 (11). pp. 1391–1398.
8. Hiraiwa A., Nouchi S., Toshinori M. et al. New tandem cold rolling mill at Toyo Works. *CAMP-ISIJ*, 2002. No 15. pp. 321–323.
9. Lagoda T., Derevyanko E. Zhizn' moyo – zhestyanka 2003 [My Life is a Tin Can 2003]. *Biznes* [Business], 2003. No 34. pp. 110–113.
10. Vasilyov Ya. D., Putnoki A. Yu., Simenenko A. V. Koncepciya razvitiya prokatnogo proizvodstva kombinata «Zaporozhstal» [The concept of the development of rolling production at the «Zaporozhstal» Integrated Iron and Steel Works]. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'* [Metallurgical and mining industry], 2006. No 2. pp. 48–51.
11. Pimenov A. F., Soskovec O. N., Trajno A. I., Trajno V. L., Netesov N. P. *Holodnaya prokatka i otdelka zhesti*. Moskva: Metallurgiya, 1990. 208 p.
12. Vasilyov Ya. D. *Inzhenernye modeli i algoritmy raschyota parametrov holodnoj prokatki* [Cold rolling and finishing of tinplate]. Moscow: Metallurgiya, 1995. 368 p.
13. Konovalov Yu. V., Karmazina I. V. Nereshennyye zadachi pri organizacii proizvodstva zhesti [Unsettled problems in tinplate production organization]. *Obrabotka materialov davleniem* [Materials working by pressure], 2015. No 1 (40). pp. 163–168.

Надійшла (received) 28.09.2018

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

**Коновалов Юрій Вячеславович (Коновалов Юрий Вячеславович, Konovalov Yuriy Viacheslavovych) (1931-2016)** – доктор технічних наук, професор, Донецький національний технічний університет, професор кафедри обробки металів тиском; м. Донецьк, Україна.

**Кармазіна Ірина Василівна (Кармазина Ирина Васильевна, Karmazina Iryna Vasylivna)** – аспірант, Державний вищий навчальний заклад «Приазовський державний технічний університет»; м. Маріуполь, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7464-3725>; e-mail: [karmazirinka@gmail.com](mailto:karmazirinka@gmail.com)

**Присяжний Андрій Григорович (Присяжный Андрей Григорьевич, Prisyazhnyi Andriy Hryhorovych)** – кандидат технічних наук, доцент, Державний вищий навчальний заклад «Приазовський державний технічний університет», доцент кафедри обробки металів тиском; м. Маріуполь, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8062-075X>; e-mail: [agp87514@gmail.com](mailto:agp87514@gmail.com)

**Кухар Володимир Валентинович (Кухарь Владимир Валентинович, Kukhar Volodymyr Valentynovych)** – доктор технічних наук, професор, Державний вищий навчальний заклад «Приазовський державний технічний університет», завідувач кафедри обробки металів тиском; м. Маріуполь, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4863-7233>; e-mail: [kvv.mariupol@gmail.com](mailto:kvv.mariupol@gmail.com)

**Е. В. ПАРУСОВ, С. І. ГУБЕНКО, О. В. ПАРУСОВ, І. М. ЧУЙКО<sup>7</sup>**

### **РОЗРОБКА СУЧАСНОГО ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОГО СПОСОБУ ВИРОБНИЦТВА ХОЛОДНОДЕФОРМОВАНОЇ АРМАТУРИ ДЛЯ ПОПЕРЕДНЬО НАПРУЖЕНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ**

Розроблена енергозберігаюча технологія виробництва холоднодеформованої стабілізованої арматури зі сталі С86D (5,0Вр1400-Р1; 6,0Вр1400-Р1; 5,0В1500-Р1), яка призначена для виготовлення попередньо-напружених залізобетонних конструкцій, в тому числі для виробництва канатів типу 2Л, які використовуються для захисних оболонок огороження конструкції локалізуючої системи безпеки атомних електростанцій. Виготовлена арматура діаметром 5,0–6,0 мм відповідає вимогам зарубіжних стандартів EN 10138-2:2009, BS 5896:1980, NEN 3868:2001 та MSZ 5720:1993. Доведена можливість виготовлення за скороченою технологічною схемою холоднодеформованої стабілізованої арматури діаметром 9,6 мм зі сталі С82D<sup>V</sup>, що дозволяє при армуванні залізобетонних шпал суттєво скоротити витрати металу ~ на 7 %. Результати досліджень свідчать про те, що одним з перспективних напрямків подальших досліджень при виробництві холоднодеформованої арматури діаметром 9,6 мм є освоєння технології виробництва бунтового прокату діаметром 15,0–16,0 мм зі сталі С86D, однак це потребує модернізації діючих ліній повітряного охолодження металургійних підприємств.

**Ключові слова:** холодна пластична деформація, бунтовий прокат, напружена арматура, клас міцності, деформаційно-термічна обробка, високовуглецева сталь/

**Э. В. ПАРУСОВ, С. И. ГУБЕНКО, О. В. ПАРУСОВ, И. Н. ЧУЙКО**

### **РАЗРАБОТКА СОВРЕМЕННОГО ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО СПОСОБА ПРОИЗВОДСТВА ХОЛОДНОДЕФОРМИРОВАННОЙ АРМАТУРЫ ДЛЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО-НАПРЯЖЕННЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

Разработана энергосберегающая технология производства холоднодеформированной стабилизированной арматуры из стали С86D (5,0Вр1400-Р1; 6,0Вр1400-Р1; 5,0В1500-Р1), предназначенной для изготовления предварительно напряженных железобетонных конструкций, в том числе для канатов типа 2Л, используемых для защитных оболочек ограждений конструкций локализирующей системы безопасности атомных электростанций. Полученная стабилизированная арматура диаметром 5,0–6,0 мм соответствует требованиям зарубежных стандартов EN 10138-2:2009, BS 5896:1980, NEN 3868:2001 и MSZ 5720:1993. Показана возможность производства холоднодеформированной стабилизированной арматуры диаметром 9,6 мм из стали С82D<sup>V</sup> по сокращенной технологической схеме, что позволяет при армировании железобетонных шпал существенно упростить технологию производства и сократить расход металла ~ на 7 %. Результаты исследований свидетельствуют о том, что одним из перспективных направлений дальнейших исследований, при производстве холоднодеформированной арматуры диаметром 9,6 мм, является освоение технологии производства бунтового проката диаметром 15,0–16,0 мм из стали С86D, однако это требует модернизации действующих линий воздушного охлаждения металлургических предприятий.

**Ключевые слова:** холодная пластическая деформация, бунтовой прокат, напрягаемая арматура, класс прочности, деформационно-термическая обработка, высокоуглеродистая сталь/

**E. V. PARUSOV, S. I. GUBENKO, O. V. PARUSOV, I. N. CHUIKO**

### **DEVELOPMENT MODERN ENERGY-EFFICIENT METHOD OF PRODUCTION OF COLD-DEFORMED ARMATURE FOR PRESTRESSED REINFORCED CONCRETE CONSTRUCTION**

Development energy-saving technology for the production of cold-deformed stabilized armature of steel С86D (5,0Вр1400-Р1; 6,0Вр1400-Р1; 5,0В1500-Р1) intended for the manufacture of prestressed reinforced concrete structures, including for type 2L ropes used for protective fencing designs of the localizing system of safety of nuclear power plants. The resulting stabilized reinforcement with a diameter of 5.0–6.0 mm corresponds to the international standards EN 10138-2:2009, BS 5896:1980, NEN 3868:2001 and MSZ 5720:1993. The possibility of producing cold-deformed stabilized armature with a diameter of 9.6 mm steel С82D<sup>V</sup> according to an abbreviated technological scheme is shown, which allows for the reinforcement of reinforced concrete sleepers to significantly simplify the production technology and reduce metal consumption ~ by 7%. Research results indicate that one of the promising areas for further research, in the production of cold-formed reinforcement with a diameter of 9.6 mm, is to master the technology for the production of roll-out steel with a diameter of 15.0–16.0 mm from С86D steel, but this requires upgrading the existing air cooling lines metallurgical enterprises.

**Keywords:** cold plastic deformation, wire rod, prestressed armature, strength class, heat and deformation treatment, high carbon steel.

**Вступ.** Сучасні технології виготовлення високоміцних холоднодеформованих виробів з бунтового прокату орієнтовані на скорочення металоємності конструкцій, зниження трудомісткості та матеріальних витрат. Досягти поліпшення техніко-економічних показників дозволяють більш жорсткі вимоги до якості початкової сировини – бунтового прокату з високовуглецевої сталі [1–3].

Загальні тенденції при виробництві високоміцних матеріалів, які призначені для посилення будівельних конструкцій, полягають в можливості збільшення як діаметру арматури, так і її класу міцності. Дослідження, які направлені на досягнення більш високого класу міцності холоднодеформованих виробів, потребують встановлення ефективного

впливу технологічних чинників (хімічний склад, легування або мікролегування сталі, термічний або деформаційно-термічний вплив, особливості режиму холодної пластичної деформації і завершальна термічна обробка) на формування структури сталі. Одним з головних методів зміцнення холоднодеформованих виробів є дислокаційний механізм, який обумовлений підвищенням щільності дислокацій та їх взаємодією. Очевидно, що безладне підвищення щільності дислокацій в металі не призводить до зростання конструктивної міцності, тому ефективним слід вважати збільшення кількості дислокацій з одночасним їх перерозподілом і утворенням стійких стінок комірок. Чим більше щільність дислокацій в сталі, тим вище рівень

деформаційного зміцнення, але при великих ступенях деформації в металі можуть утворюватися незворотні дефекти (субмікротріщини), які провокують суттєве зменшення механічних властивостей та передчасне руйнування будівельних конструкцій [4–6].

**Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями.** За останні роки на світових ринках зріс попит на бунтовий прокат з вуглецевої сталі, який піддається холодній пластичній деформації з великими ступенями обтиснення, для виготовлення виробів високої міцності (сталеві арматурні канати, холоднодеформована арматура періодичного та гладкого профілів, пружинний дріт, металокорд, дріт для рукавів високого тиску та сердечників сталевих алюмінієвих неізолюваних проводів, сталеві будівельні фібри тощо). Це обумовлено модернізацією парку волоочильного обладнання та постійним прагненням до вдосконалення технології виробництва метизної продукції, що спрямовано на підвищення енергоефективності та зменшення матеріальних витрат [7, 8].

Спорудження конструкцій для потреб промисловості та цивільного будівництва викликає необхідність освоєння сучасних технологій виробництва холоднодеформованої арматури класу міцності не менше 1400 МПа. Відомо, що найбільш ефективним напрямком підвищення міцності сталевих виробів є деформаційне зміцнення сталей із вмістом вуглецю 0,7–0,9 % під час холодної пластичної деформації. Однак у 90 % випадків досягнутий рівень якісних показників високовуглецевої сталі на національних металургійних заводах є недостатнім для забезпечення необхідного класу міцності холоднодеформованої арматури, тому метизні підприємства зіштовхуються з необхідністю поліпшення структури сталі перед початком деформації (волочіння) за допомогою енерговитратної термічної обробки – патентування. На металургійних підприємствах України загальні вимоги до бунтового прокату з високовуглецевої сталі регламентуються ДСТУ 3683-98 і ГОСТ 14959-79. Зазначені стандарти не нормують вміст неметалевих включень та не враховують кількісну оцінку надлишкових фаз (ферит, цементит) в структурі сталі. Згідно з ДСТУ 3683-98 допускається досить великий розмах тимчасового опору розриву, а по ГОСТ 14959-79 взагалі відсутні вимоги до механічних властивостей і оцінки структурних складових в сталі. На практиці бунтовий прокат з високовуглецевих сталей діаметром 10,0-12,0 мм має значний розбіг фактичних значень тимчасового опору розриву в межах плавки ( $\sigma_B \sim 150$  МПа) та досить низькі характеристики пластичності ( $\delta_{10} \leq 10$  %,  $\psi \leq 22$  %).

До головних показників, які суттєво впливають на якість бунтового прокату, відносять: хімічний склад, технології розкислення, позапічної обробки та розливання сталі, температурно-часові умови нагрівання литої заготовки у печі, параметри режиму гарячої деформації та швидкість повітряного охолодження металу на транспортері лінії Стелмор.

Вказані показники при раціональному їх поєднанні дозволяють суттєво впливати на якість бунтового прокату шляхом внесення відповідних коригувань у діючий технологічний процес.

Напрямки розвитку світової металургійної галузі свідчать про те, що для підвищення вихідного класу міцності бунтового прокату слід застосовувати сталь з вмістом вуглецю 0,82–0,84 % леговану карбидоутворюючими елементами, але з точки зору економічної складової це є недоцільним. На даний час накопичено значний досвід, який пов'язаний з технологічними особливостями виготовлення високовуглецевих сталей, але незважаючи на це вони постійно перебувають під пильною увагою дослідників, тому що на практиці реалізовані не всі потенційно можливі резерви підвищення їх міцності при безперервному охолодженні з прокатного нагріву.

Приймаючи до уваги підписану угоду між Україною і Європейським Союзом про зону вільної торгівлі, розробка і впровадження на металургійних підприємствах нових технологічних рішень, достатніх для виготовлення високоякісного бунтового прокату з високовуглецевих сталей, дозволить вступити в конкурентну боротьбу на світових ринках збуту й гідно представляти металопродукцію національного виробництва.

Таким чином, дослідження, що направлені на пошук інноваційних технологічних рішень, які забезпечують ефективне поєднання структури і механічних властивостей високовуглецевих сталей без додаткового застосування енерговитратних термічних обробок, є актуальною задачею, яка відповідає пріоритетному напрямку розвитку гірничо-металургійної комплексу України.

**Мета роботи.** Метою роботи є розробка наскрізної технології виробництва холоднодеформованої стабілізованої арматури, яка призначена для виготовлення попередньо напружених залізобетонних конструкцій високої міцності.

**Матеріал і методика досліджень.** У якості матеріалу обрані промислові партії бунтового прокату зі сталі C86D (% ваг.: C = 0,88; Mn = 0,68; Si = 0,18; P = 0,010; S = 0,003; Cr = 0,03; Ni = 0,06; Cu = 0,12; N = 0,007; B = 0,0012) і C82D (% ваг.: C = 0,83; Mn = 0,69; Si = 0,19; P = 0,010; S = 0,003; Cr = 0,04; V = 0,06; Ni = 0,07; Cu = 0,11; N = 0,006; B = 0,0014). Використане обладнання: оптичний світловий мікроскоп «Axiovert M200 Mat», універсальна випробувальна машина «TTDM Instron». Механічні властивості визначали за ГОСТ 1497-84, бал і кількість сорбітовидного перліту згідно з методиками ГОСТ 8233-56.

**Результати досліджень та їх обговорення.** Холоднодеформована стабілізована арматура та арматурні канати з низькою релаксацією відносяться до найбільш високоміцного різновиду арматури, що призначена для виготовлення попередньо напружених залізобетонних конструкцій. Номенклатура і показники якості арматури що виготовляється в Україні мають деякі відмінності, які пов'язані з більш низькими класами міцності, на відміну від зарубіжних аналогів. Відповідно до вимог європейського

стандарту EN 10138:2009 (частини 2, 3), який об'єднує основні різновиди напруженої арматури, передбачено виробництво: високоміцного дроту періодичного й гладкого профілю діаметром 4,0–10,0 мм з границею текучості 1300–1500 МПа і тимчасовим опором розриву 1600–1800 МПа; трьохдротяних канатів діаметром 5,2–7,5 мм з границею текучості 1600–1700 МПа і тимчасовим опором розриву 1800–1900 МПа; семидротяних канатів діаметром 7,0–18,0 мм з границею текучості 1500–1800 МПа і тимчасовим опором розриву 1770–2000 МПа. Існують також й інші міжнародні нормативні документи, якими керуються при виготовленні напруженої арматури (BS 5896:1980, NEN 3868:2001, ASTM A416M-05, NBN I 10-0030, UNI 7676, MSZ 5720:1993). Порівняльний аналіз міжнародних стандартів за вимогами до механічних властивостей свідчить про те, що всі вони приблизно однакові та залежать лише від класу міцності арматури, який визначається за тимчасовим опором розриву на відміну від національних стандартів.

У умовах України холоднодеформована арматура виготовляється у відповідності до вимог ГОСТ 7348-81 (дротяна арматура) і ГОСТ 13840-68/2004 (арматурні канати).

З огляду на те, що якісні показники бунтового прокату діаметром 8,0–12,0 мм металургійних підприємств України не дозволяють здійснити переробку металу з використанням способу прямого волочіння в високоміцний дріт, традиційна технологічна схема складається з наступних операцій: ПП (X, M) → (B, B) → K → П → ППП → B → C → ЗБ, де: ПП – підготовка поверхні прокату до волочіння, X, M – хімічний або механічний спосіб видалення окалини відповідно, B, B – нанесення підмастильного шару вапна або бури на поверхню прокату відповідно, K – калібрування прокату зі ступенем деформації до 10 %, П – термічна обробка (патентування) проміжної заготовки, ППП – повторна підготовка поверхні прокату до волочіння, B – волочіння проміжної заготовки на кінцевий діаметр дроту, C – стабілізуюча обробка (низькотемпературний відпал), ЗБ – змотування на дерев'яний барабан.

При патентуванні проміжної заготовки, головною метою якого є підвищення класу міцності сталі, виконують нагрів в прохідній печі до температур 970–1000 °C з подальшим охолодженням металу в умовах, які близькі до ізотермічних (швидке переохолодження від 970–1000 °C до 550–520 °C). У якості середовища при охолодженні сталі використовують ванни з розплавом свинцю або солей. Дифузійний розпад аустеніту при патентуванні проходить при більш низьких температурах, що забезпечує формування структури сталі з високим ступенем дисперсності перліту, яка є сприятливою для подальшої холодної

пластичної деформації прокату з великими ступенями обтиснення [9].

З метою зменшення матеріальних витрат і заощадження енергоносіїв авторами цієї роботи в умовах металургійного підприємства розроблена інноваційна технологія високотемпературної деформаційно-термічної обробки бунтового прокату з високовуглецевих сталей, у тому числі легованих карбідоутворюючими елементами (хром і/або ванадій). Наприклад, структура сталі С86D за розробленими режимами після безперервного охолодження від температур гарячої прокатки у максимальній мірі наближена до структури сталі, що була піддана патентуванню [10]. Впровадження нової технології, на відміну від діючої, дозволило зменшити глибину знеуглецьованого шару в 1,4–1,8 рази, збільшити кількість сорбітовидного перліту в 1,4 рази, виключити появу ділянок пластинчастого перліту більше 3–4 балу. Окрім зазначених відмінностей в формуванні структури сталі, запропонована технологія дозволила підвищити тимчасовий опір розриву прокату на ~ 5 %, а відносне звуження і відносне подовження на 34 і 35 % відповідно (табл. 1).

Враховуючи досягнутий рівень показників якості бунтового прокату, була запропонована скорочена технологія його переробки в холоднодеформовану арматуру, яка виключала калібрування, патентування та повторну підготовку поверхні прокату до волочіння: ПП (X, M) → (B, B) → B → C → ЗБ. Експериментальна технологія переробки бунтового прокату зі сталі С86D діаметром 8,0 мм і 10,0 мм була задіяна для виготовлення стабілізованої арматури періодичного профілю діаметром 5,0–6,0 мм Вр-Р1 для попередньо напружених залізобетонних конструкцій (ГОСТ 7348-81) і гладкого профілю діаметром 5,0 мм (ТУ У 24.3-26209430-027) – для виробництва арматурних канатів типу 2Л попередньо напружених захисних оболонок, якими обгороджують конструкції локалізуючої системи безпеки атомних електростанцій. Виробництво дротяної заготовки проходило у відповідності з діючими технологічними інструкціями метизного підприємства на прямоточному волочильному стані за 3–5 проходів. Одиниці обтиснення при виготовленні дротяної заготовки не перевищували 20 %. На завершальній стадії на поверхню дроту наносилися вм'ятини, після чого проводився стабілізуючий відпал з протидіючою напругою, величина якої не перевищувала 60 % від номінального розривного зусилля та розраховувалася в залежності від діаметру і класу міцності готових металовиробів. На лінії стабілізації зусилля витяжки створюється за рахунок різниці швидкостей обертання витяжних шківів, які розташовані до і після індукційної нагрівальної печі.

Таблиця 1. Показники якості бунтового прокату зі сталі С86D діаметром 10,0 мм

Режим технології	Кількість сорбітовидного перліту, %	Глибина знеуглецьованого шару, %	σв, МПа	ψ, %	δ <sub>10</sub> , %
Діючий	58, інше перліт 2–6 балу	1,12	1128	21	7
Дослідний	89, інше перліт 2–3 балу	0,62	1210	31	11

Регулювання зусилля витяжки виконується вручну за показаннями приладів, що забезпечує автоматичну зміну швидкостей обертання другої пари витяжних шківів. Експериментальна технологія виробництва холоднодеформованої арматури характеризувалась високою стабільністю, обривів дроту й передчасного зношування волок не спостерігалося. Механічні властивості холоднодеформованої арматури гладкого і періодичного профілю, яка виготовлена з бунтового прокату діаметром 8,0 мм і 10,0 мм наведені у табл. 2. Вимоги до механічних властивостей стабілізованої холоднодеформованої арматури за різними нормативними документами представлені у табл. 3, 4. Порівняльний аналіз наведених даних (див. табл. 2–4) свідчить про те, що стабілізована арматура діаметром 5,0–6,0 мм, яка виготовлена за експериментальною енергозберігаючою технологією, відповідає за тимчасовим опором розриву класу міцності 1770 МПа зарубіжних стандартів EN 10138-2:2009, BS 5896:1980, NEN 3868:2001 та MSZ 5720:1993. Враховуючи позитивні результати переробки прокату зі сталі С86D, а також особливості впливу високотемпературної деформаційно-термічної обробки на структуру і механічні властивості високовуглецевих сталей [10, 11] було вирішено виготовити дослідну партію бунтового прокату діаметром 14,0 мм зі сталі С82D<sup>V</sup> з метою виробництва стабілізованої холоднодеформованої арматури діаметром 9,6 мм, яка призначена для армування залізобетонних шпал нового покоління [3]. Механічні властивості прокату представлені у табл. 5.

Переробка бунтового прокату діаметром 14,0 мм зі сталі С82D<sup>V</sup> в арматуру періодичного профілю діаметром 9,6 мм (ТУ 0930-011-01115863-2008) проводилась по аналогії зі сталю С86D із застосуванням способу прямого волочіння. Виготовлення дротяної заготовки проводилось на прямоточному волочильному стані за 5 проходів, після чого наносився тристоронній профіль і проводився

стабілізуючий відпал з протидіючою напругою. Технологічний процес волочіння характеризувався високим ступенем стабільності та задовільним захопленням мастила в осередок деформації (волокни), про що свідчив темно-матовий колір поверхні дроту. Механічні властивості та вимоги до холоднодеформованої арматури діаметром 9,6 мм представлені у табл. 6.

Слід зазначити, що виготовлення холоднодеформованої арматури періодичного профілю дозволяє при армуванні залізобетонних шпал скоротити витрати металу на  $\sim 7\%$  та значно спростити технологічний режим виробництва – замість 44 холоднодеформованих арматурних дротів типу 3,0Вр1400К-Р1 можливо використовувати 4 одиниці арматури діаметром 9,6 мм класом міцності 1400 МПа. Таким чином, з метою подальшого здешевлення собівартості виробництва холоднодеформованої стабілізованої арматури діаметром 9,6 мм необхідно використовувати бунтовий прокат зі сталі С86D діаметром 15,0–16,0 мм, виготовлення якого потребує модернізації систем повітряного охолодження розташованих на транспортері лінії Стелмор [9].

В світовій практиці сучасного будівництва використання арматурного прокату з високовуглецевих сталей складає до 50 % від загальної потреби в арматурних сталях [12]. В Україні та країнах ближнього зарубіжжя виробництво холоднодеформованої арматури з високовуглецевої сталі вельми обмежене і складає не більше 5 % від загального обсягу споживання.

Безперечним є і те, що один з критеріїв ефективного використання різноманітних попередньо-напружених залізобетонних конструкцій полягає в можливості підвищення їх конструктивної міцності. Це обумовлює не тільки збільшення надійності та довговічності конструкцій, але й зменшення металоємності самого будівництва.

Таблиця 2. Механічні властивості холоднодеформованої стабілізованої арматури зі сталі С86D

Діаметр прокату/діаметр арматури, мм	Клас міцності, МПа	Маркування	Розривне зусилля, МПа	Зусилля (P <sub>0,2</sub> ), МПа	Відносне видовження, $\delta_{100}$ , %	Число перегинів
8,0/5,0	1400	5,0Вр1400-Р1	<u>34200–35500</u> 34850	<u>31600–31800</u> 31700	<u>5,0–5,0</u> 5,0	<u>5,0–10,0</u> 7,5
10,0/5,0	1400	5,0Вр1400-Р1	<u>36300–37300</u> 36800	<u>33540–34460</u> 34000	<u>4,5–5,0</u> 4,75	<u>3–5</u> 4
10,0/6,0	1400	6,0Вр1400-Р1	<u>49200–50800</u> 50000	<u>43610–43780</u> 43695	<u>5,0–5,5</u> 5,25	-

Примітка: \* – у чисельнику вказані мінімальне і максимальне значення, в знаменнику – середнє

Таблиця 3. Вимоги до механічних властивостей холоднодеформованої арматури за національними стандартами

Діаметр арматури, мм	Клас міцності, МПа	Маркування	Розривне зусилля, МПа	Зусилля (P <sub>0,2</sub> ), МПа	Відносне видовження, $\delta_{100}$ , %	Число перегинів*
ГОСТ 7348-81						
5,0	1400	5,0Вр1400-Р1	32800	27500	4	5(3)
6,0	1400	6,0Вр1400-Р1	47300	39700	5	-
ТУ У 24.3-26209430-027						
5,0	1500	5,0В1500-Р1	32800	28200	4	5

Примітка: \* – у дужках вказані значення для арматури періодичного профілю

Таблиця 4. Вимоги до механічних властивостей холоднодеформованої арматури за міжнародними стандартами

Діаметр арматури, мм	Клас міцності, МПа	Нормативне розривне зусилля ( $F_m$ ), МПа	Розрахункове зусилля ( $R_{0.1}$ ) <sup>1</sup> , МПа	Відносне видовження, $\delta_{100}$ , %	Число перегинів <sup>2</sup>
EN 10138-2:2009/BS 5896:1980					
5,0	1670	32700	28800/27800	3,5	4(3)
5,0	1770	34700	30500/29500	3,5	4(3)
6,0	1670	47300	41600/40200	3,5	4(3)
6,0	1770	50100	44100/42600	3,5	4(3)
NEN 3868:2001					
5,0	1770	34700	29800	3,5	3
6,0	1670	47300	40700	3,5	3
MSZ 5720:1993					
5,0	1770	34700	28500	3,5	4
6,0	1770	50100	41000	3,5	3

Примітка: <sup>1</sup> – розрахункове зусилля  $R_{0.1}$ , яке становить  $0,86 \cdot F_m$ ; <sup>2</sup> – у дужках вказані значення для арматури періодичного профілю

Таблиця 5. Показники якості бунтового прокату зі сталі C82D<sup>V</sup> діаметром 14,0 мм

Режим виробництва	Кількість сорбітовидного перліту, %	Глибина знеуглецьованого шару, %	$\sigma_b$ , МПа	$\psi$ , %	$\delta_{10}$ , %
Дослідний	83, інше перліт 2–3 балу	0,41	1268	28	10

Таблиця 6. Механічні властивості холоднодеформованої арматури зі сталі C82D<sup>V</sup>

Показники	Діаметр арматури, мм	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_{0.2}$ , МПа	$\delta_{10}$ , %	Число перегинів на оправці діаметром 100 мм
Фактичні дані	9,54	1680	1458	7,3	5
Вимоги згідно з ТУ 0930-011-01115863-2008	9,45–9,81	$\geq 1570$	$\geq 1400$	$\geq 6$	3

Резервом економії при застосуванні арматурного прокату з високовуглецевих сталей є перехід від зварного типу з'єднання внахлест на механічне (гвинтове, конусне, циліндричне), що дозволяє скорочувати витрати металу і підвищувати надійність з'єднань.

Досвід авторів при виробництві високоміцних стабілізованих арматурних канатів діаметром 9,6–18,2 мм з високовуглецевих сталей свідчить про те, що показники міцності у холоднодеформованого прокату на 20–25 % вищі ніж у термічнозмцненого, а втомна міцність становить не менше 2 млн. циклів. В роботі [3] встановлено, що релаксаційна і корозійна стійкість, а також втомна міцність залежать від рівномірності формування структури високовуглецевої сталі, а при досягненні ефективного структурного стану вказані показники відповідають вимогам сучасної нормативної документації. Отже, виробництво високоміцної холоднодеформованої арматури залежить від раціонального поєднання хімічного складу сталі, режимів деформаційно-термічної обробки бунтового прокату у потоці дрових станів, технології холодної пластичної деформації і режимів завершальної обробки (стабілізуючий відпал).

Очевидно, собівартість виробництва арматурного прокату з високовуглецевої сталі істотно нижча за собівартість виробництва термічнозмцненої арматури, що обумовлено відсутністю у складі сталей дорогих легуючих елементів. Вимоги, які пред'являються до механічних властивостей

високоміцної холоднодеформованої арматури, визначають ряд нових підходів до теоретичних та технологічних основ виробництва початкової сировини (бунтового прокату) з високовуглецевої сталі [13]. Результати експериментів дозволяють зробити висновок, що альтернативного шляху підвищення класу міцності арматури діаметром 5,0–9,6 мм, окрім деформаційного зміцнення, на сьогодні не існує, а промислове впровадження енергозберігаючої технології переробки бунтового прокату з використанням способу прямого волочіння за рахунок відсутності калібрування, патентування і повторної підготовки поверхні прокату до волочіння є цілком обґрунтованим та економічно доцільним. За всіма показниками якості виготовлена стабілізована холоднодеформована арматура діаметром 5,0–6,0 мм відповідає вимогам національних та світових стандартів.

**Висновки.** Розроблена енергозберігаюча технологія виробництва стабілізованої холоднодеформованої арматури зі сталі C86D (5,0Bp1400-P1, 6,0Bp1400-P1, 5,0B1500-P1), яка призначена для виготовлення попередньо-напружених залізобетонних конструкцій, в тому числі для виробництва канатів типу 2Л захисних оболонок огороження конструкції локалізуючої системи безпеки атомних електростанцій. Виготовлена за експериментальною технологією холоднодеформована арматура за тимчасовим опором розриву відповідає класу міцності 1770 МПа зарубіжних стандартів EN 10138-2:2009, BS 5896:1980,

NEN 3868:2001 та MSZ 5720:1993. Встановлена можливість виготовлення стабілізованої холоднодеформованої арматури діаметром 9,6 мм зі сталі С82D<sup>V</sup> за скороченою технологічною схемою, що дозволяє при армуванні залізобетонних шпал скоротити витрати металу на ~ 7 %. Зі збільшенням діаметру бунтового прокату, особливо великих діаметрів, суттєво знижується його фактична швидкість охолодження, а тому є актуальними подальші дослідження пов'язані з необхідністю модернізації на металургійних підприємствах України дуттьових вентиляторних систем, які розташовані на транспортері лінії Стелмор. Це забезпечить можливість виготовлення холоднодеформованої арматури зі сталі С86D діаметром 9,6 мм з бунтового прокату діаметром 15,0–16,0 мм і дозволить суттєво скоротити собівартість виготовлення металопродукції у порівнянні зі сталлю С82D<sup>V</sup>.

#### Список літератури

- Белалов Х. Н., Клековкин А. А., Клековкина Н. А., Гун Г. С., Корчунов А. Г., Полякова М. А. *Стальная проволока*. – Магнитогорск: МГТУ им. Г. И. Носова, 2011. 689 с.
- Parusov E. V., Parusov V. V., Sychkov A. B., Klimenko A. P., Sagura L. V., Sivak A. I., Development of energy- and resource-saving production technology of high-strength strands. *Metallurgical and Mining Industry*. 2016. № 5. pp. 100–104.
- Производство высокопрочной стальной арматуры для железобетонных шпал нового поколения / под ред. М. В. Чукина. Москва: Metallurgizdat, 2014. 276 с.
- Тушинский Л. И., Батаев А. А., Тихомирова Л. Б. *Структура перлита и конструктивная прочность стали*. Новосибирск: ВО «Наука». Сибирская издательская фирма, 1993. 280 с.
- Счастливцев В. М., Мирзаев Д. А., Яковлева И. Л. *Перлит в углеродистых сталях*. Екатеринбург: УрО РАН, 2006. 311 с.
- Гриднев В. Н., Гаврилюк В. Г., Мешков Ю. Я. *Прочность и пластичность холоднодеформированной стали*. Киев: Наукова думка, 1974. 232 с.
- Парусов Э. В., Губенко С. И. Использование инновационных решений при реализации экологически чистой ресурсосберегающей технологии переработки бунтового проката на метизном переделе / *Международная научно-техническая конференция «Новые и нетрадиционные технологии в ресурсо- и энергосбережении»*, Одесса, 21–23 сентября, 2016. С.147–149.
- Парусов Э. В., Губенко С. И. Технологии изготовления холоднодеформированной проволочной арматуры с использованием способа прямого волочения / *Научные чтения им. чл.-корр. РАН И. А. Оdinga «Механические свойства современных конструкционных материалов»*, Москва, 6–7 сентября, 2016. С. 100.
- Парусов Е. В., Сичков О. Б., Губенко С. И., Малашкин С. О., Сагура Л. В. Про ефективні шляхи вдосконалення режимів регульованого повітряного охолодження бунтового прокату в промислових умовах. *Наукові праці Вінницького національного технічного університету*. 2017. № 3. С. 1–5.
- Parusov E. V., Parusov V. V., Sagura L. V., Derevyanchenko I. V., Dolgiy S. V., Gremechev S. A., Demyanova L. I. Development of thermomechanical treatment of coil rolled products made of steel C86D micro-alloyed with boron. *Metallurgical and Mining Industry*. 2016. № 6. pp. 70–74.
- Парусов Э. В., Клименко А. П., Луценко В. А., Чуйко И. Н., Сагура Л. В., Сивак А. И. Влияние температуры нагрева на кинетику распада аустенита высокоуглеродистой стали С82D<sup>V</sup>. *Металознавство та термічна обробка металів*. 2018. № 1 (80). С. 34–42.
- Мадатян С. А. *Арматура железобетонных конструкций*. Москва: Воентехлит, 2000. 256 с.
- Губенко С. И., Парусов Э. В. *Пластичность сплавов с различной структурой*. Учебное пособие по физическим основам пластичности. Germany-Mauritius: Palmarium Academic Publishing. 2017, – 192 с

#### References (transliterated)

- Belalov H. N., Klekovkin A. A., Klekovkina N. A., Gun G. S., Korchunov A. G., Polyakova M. A. *Stalnaya provoloka* [Steel wire]. Magnitogorsk, MG TU im. G. I. Nosova, 2011. 689 p. (in Russian).
- Parusov E. V., Parusov V. V., Sychkov A. B., Klimenko A. P., Sahura L. V., Sivak A. I., Development of energy- and resource-saving production technology of high-strength strands. *Metallurgical and Mining Industry*. 2016. No 5. pp. 100–104 (in England).
- Производство высокопрочной стальной арматуры для железобетонных шпал нового поколения [Production of high-strength steel reinforcement for concrete sleepers of the new generation] / pod red. M. V. Chukina. Moscow, Metallurgizdat, 2014. 276 p. (in Russian).
- Tushinskiy L. I., Bataev A. A., Tihomirova L. B. *Struktura perlita i konstruktivnaya prochnost stali* [Perlite structure and structural strength of steel]. Novosibirsk, VO “Nauka”, Sibirskaya izdatelskaya firma, 1993. 280 p. (in Russian).
- Schastlivtsev V. M., Mirzaev D. A., Yakovleva I. L. *Perlit v uglerodistykh stalyah* [Perlite in carbon steels]. Ekaterinburg, UrO RAN, 2006. 311 p. (in Russian).
- Gridnev V. N., Gavrilyuk V. G., Meshkov Yu. Ya. *Prochnost i plastichnost holodnodeformirovannoy stali* [Strength and ductility of cold-rolled steel]. Kiev, Naukova dumka, 1974. 232 p. (in Russian).
- Parusov E. V., Gubenko S. I. Ispolzovanie innovatsionnykh resheniy pri realizatsii ekologicheski chistoy resursosberegayushey tehnologii pererabotki buntovogo prokata na metiznom pereделе [The use of innovative solutions in the implementation of environmentally friendly resource-saving technologies for the processing of riot rolled metal at the redistribution industry]. *Mezhdunarodnaya nauchno-tehnicheskaya konferentsiya "Novyye i netraditsionnyye tehnologii v resurso- i energosberezenii"* [International Scientific and Technical Conference “New and Non-Traditional Technologies in Resource and Energy Saving”], Odessa, 21–23 sentyabrya, 2016. pp.147–149 (in Russian).
- Parusov E. V., Gubenko S. I. Tehnologii izgotovleniya holodnodeformirovannoy provolochnoy armatury s ispolzovaniem sposoba pryamogo volocheniya [Technologies for Manufacturing Cold-Deformed Wire Armature Using the Direct Drawing Method]. *Nauchnyye chteniya im. chl.-korr. RAN I. A. Odinga “Mechanicheskie svoystva sovremennyihkonstruktsionnykh materialov”* [Scientific Readings. Corr. RAS I. A. Odinga “Mechanical properties of modern structural materials”], Moscow, 6–7 sentyabrya, 2016. p. 100 (in Russian).
- Parusov E. V., Sychkov O. B., Gubenko S. I., Malashkin S. O., Sahura L. V. Pro effektivni shliahy vdoskonalennia rezhimiv reguliovanogo povitriyanogo oholodzhennia buntovogo prokату v promyslovykh umovah [On effective ways to improve the modes of regulated air cooling riot rolling in industrial conditions]. *Naukovi pratsi Vinnytskogo natsionalnogo tehnichnogo universitetu* [Scientific works of Vinnytsia National Technical University], 2017. No 3. pp. 1–5 (in Ukrainian).
- Parusov E. V., Parusov V. V., Sahura L. V., Sivak A. I., Klimenko A. P., Sychkov A. B. Development of thermomechanical treatment of coil rolled products made of steel C86D micro-alloyed with boron. *Metallurgical and Mining Industry*, 2016. No 6. pp. 70–74 (in England).
- Vliianie temperatury nagreva na kinetiku raspada austenita vysokouglerodistoi stali C82D<sup>V</sup> [Influence of the heating temperature on the kinetics of the collapse of the high-carbon austenite steel C82D<sup>V</sup>]. *Metaloznavstvo ta termichna obrobka metaliv* [Metallurgy and thermal treatment of metals]. 2018, No 1 (80). pp. 34–42 (in Russian).
- Madatyan S. A. *Armatura zhelezobetonnykh konstruksii* [Armature of reinforced concrete structures]. Moskwa, Voentehlit, 2000. 256 p. (in Russian).
- Gubenko S. I., Parusov E. V. *Plastichnost splavov s razlichnoy strukturoy*. Uchebnoe posobie po fizicheskim osnovam plastichnosti [Plasticity of alloys with different structure. A manual on the physical fundamentals of plasticity]. Germany-Mauritius: Palmarium Academic Publishing. 2017, 192 p. (in Russian)

Надійшла (received) 27.10.2018



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

**Парусов Едуард Володимирович (Парусов Эдуард Владимирович, Parusov Eduard Vladimirovich)** – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, завідуючий відділом термічної обробки металу для машинобудування Інституту чорної металургії НАН України; м. Дніпро, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4560-2043>, e-mail: [tometal@ukr.net](mailto:tometal@ukr.net)

**Губенко Світлана Іванівна (Губенко Светлана Ивановна, Gubenko Svetlana Ivanovna)** – доктор технічних наук, професор кафедри «Матеріалознавство» Національної металургійної академії України; м. Дніпро, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5427-1154>, e-mail: [sigubenko@gmail.com](mailto:sigubenko@gmail.com)

**Парусов Олег Володимирович (Парусов Олег Владимирович, Parusov Oleh Vladimirovich)** – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник відділу термічної обробки металу для машинобудування Інституту чорної металургії НАН України; м. Дніпро, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9879-6179>, e-mail: [termet@ukr.net](mailto:termet@ukr.net)

**Чуйко Ігор Миколайович (Чуйко Игорь Николаевич, Chuiko Ihor Nikolaevich)** – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник відділу термічної обробки металу для машинобудування Інституту чорної металургії НАН України; м. Дніпро, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4753-614X>, e-mail: [ferrosplav@ukr.net](mailto:ferrosplav@ukr.net)

**С. Ю. ПЛЕСНЕЦОВ**

### **СПОСІБ ТА ЕЛЕКТРОМАГНІТНО-АКУСТИЧНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ТРУБЧАСТИХ НЕФЕРОМАГНІТНИХ МЕТАЛОВИРОБІВ З ПЕРЕТИНОМ У ВИГЛЯДІ КОЛА**

Наведено опис поточної економічної та технологічної ситуації щодо сфери застосування електромагнітно-акустичних перетворювачів для контролю трубчастих металовиробів в сучасній українській економічній ситуації. Описано труднощі і технічні проблеми, а також фінансова ресурсомісткість застосування класичних способів неруйнівного контролю при контролі трубчастих виробів, в тому числі зі складною структурою поверхні, при виявленні дефектів. Наведено поширені види дефектів, які можуть виникати в металовиробах трубчастого типу. Охарактеризовані загальні можливості електромагнітно-акустичного методу перетворення для збудження ультразвукових коливань. Наведено короткий опис електромагнітно-акустичних перетворювачів. Вказані найбільш значущі відомі недоліки електромагнітно-акустичних перетворювачів. Показана ефективність застосування крутильних коливань в підвищенні чутливості електромагнітно-акустичних перетворювачів. Наведено опис розробленого методу контролю трубчастих металовиробів електромагнітно-акустичним методом за допомогою відповідних перетворювачів. Описано і схематично визуалізовано рішення для електромагнітно-акустичного перетворювача, що використовує крутильні хвилі при контролі трубчастих металовиробів. Охарактеризовані окремо і у взаємозв'язку структурні компоненти запропонованого рішення. Наведено, поставлена і вирішена задача підвищення чутливості електромагнітно-акустичного контролю за допомогою порушення і прийому бездисперсійних ультразвукових імпульсів. Наведено схему і описано пристрій електромагнітно-акустичного перетворювача, заснованого на наведеному в роботі вирішенні завдання підвищення чутливості за допомогою порушення і прийому бездисперсійних ультразвукових імпульсів. Виконана і охарактеризована проведена експериментальна оцінка ефективності розробленого методу. Продемонстрована висока здатність розробленого методу електромагнітно-акустичного контролю до виявлення дефектів трубчастих ферромагнітних металовиробів.

**Ключові слова:** ультразвуковий контроль, електромагнітно-акустичний перетворювач, метод, модель, експериментальні дослідження, дефекти металу, металовироби, трубчасті вироби.

**С. Ю. ПЛЕСНЕЦОВ**

### **МЕТОД И ЭЛЕКТРОМАГНИТНО-АКУСТИЧЕСКИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ТРУБЧАТЫХ НЕФЕРРОМАГНИТНЫХ МЕТАЛЛОИЗДЕЛИЙ С СЕЧЕНИЕМ В ВИДЕ КРУГА**

Приведено описание текущей экономической и технологической ситуации относительно сферы применимости электромагнитно-акустических преобразователей для контроля трубчатых металлоизделий в современной украинской экономической ситуации. Описаны трудности и технические проблемы, а также финансовая ресурсоемкость применения классических способов неразрушающего контроля при контроле трубчатых изделий, в том числе со сложной структурой поверхности, при выявлении дефектов. Приведены распространенные виды дефектов, которые могут возникать в металлоизделиях трубчатого типа. Охарактеризованы общие возможности электромагнитно-акустического метода преобразования для возбуждения ультразвуковых колебаний. Приведено краткое описание электромагнитно-акустических преобразователей. Указаны наиболее значимые известные недостатки электромагнитно-акустических преобразователей. Показана эффективность применения крутильных колебаний в повышении чувствительности электромагнитно-акустических преобразователей. Приведено описание разработанного метода контроля трубчатых металлоизделий электромагнитно-акустическим методом при помощи соответствующих преобразователей. Описано и схематически визуализировано решение для электромагнитно-акустического преобразователя, использующего крутильные волны при контроле трубчатых металлоизделий. Охарактеризованы отдельно и во взаимосвязи структурные компоненты предложенного решения. Приведена, поставлена и решена задача повышения чувствительности электромагнитно-акустического контроля посредством возбуждения и приема бездисперсионных ультразвуковых импульсов. Приведена схема и описано устройства электромагнитно-акустического преобразователя, основанного на приведенном в работе решении задачи повышения чувствительности посредством возбуждения и приема бездисперсионных ультразвуковых импульсов. Выполнена и охарактеризована проведенная экспериментальная оценка эффективности разработанного метода. Продемонстрирована высокая способность разработанного метода электромагнитно-акустического контроля к выявлению дефектов трубчатых ферромагнитных металлоизделий.

**Ключевые слова:** ультразвуковой контроль, электромагнитно-акустический преобразователь, метод, модель, экспериментальные исследования, дефекты металла, металлоизделия, трубчатые изделия.

**S. Yu. PLESNETSOV**

### **METHOD AND ELECTROMAGNETIC-ACOUSTIC TRANSDUCER FOR TESTING OF NON-FERROMAGNETIC METAL PRODUCTS OF CIRCULAR CROSS-SECTION**

The description of the current economic and technological situation regarding the scope of applicability of electromagnetic-acoustic transducers for the control of tubular hardware in the current Ukrainian economic situation is given. Difficulties and technical problems are described, as well as the financial resource-intensiveness of using classical methods of non-destructive testing in the control of tubular products, including those with a complex surface structure, in identifying defects. The common types of defects that can occur in tubular-type hardware are given. The general possibilities of the electromagnetic-acoustic conversion method for the excitation of ultrasonic oscillations are described. A brief description of the electromagnetic-acoustic transducers is given. The most significant known disadvantages of electromagnetic-acoustic transducers are indicated. The efficiency of using torsional vibrations in increasing the sensitivity of electromagnetic-acoustic transducers is shown. The description of the developed method for the control of tubular metal products by the electromagnetic-acoustic method using appropriate transducers is given. A solution for an electromagnetic-acoustic transducer using torsional waves when inspecting tubular hardware is described and schematically visualized. The structural components of the proposed solution are characterized separately and in interrelation. The problem of increasing the sensitivity of electromagnetic-acoustic control by means of excitation and reception of dispersionless ultrasonic pulses is given, stated and solved. A diagram is given and devices for an electromagnetic-acoustic transducer are described, based on the solution of the problem of increasing sensitivity through the excitation and reception of dispersionless ultrasonic pulses. The experimental evaluation of the effectiveness of the developed method was carried out and characterized. The demonstrated high ability of the developed method of electromagnetic-acoustic control to detect defects in tubular non-ferromagnetic hardware.

**Keywords:** ultrasonic testing, electromagnetic-acoustic transducer, method, model, experimental studies, metal defects, metal products, tubular products.

**Вступ.** Технічний розвиток в країні визначається двома основними напрямками. Наявністю досконалих технологій отримання нових матеріалів, речовин та виробів і відповідних методів та засобів контролю і діагностики, як при виробництві, так і при експлуатації [1].

Значні складнощі виникають під час виконання контролю неферромагнітних металевих виробів [2], з яких найбільш поширеними є трубчаті вироби з круговим перетином. Наявність фарби, бруду, іржі та інших дефектів (рис. 1, а) вимагають значних матеріальних втрат для спеціальної підготовки поверхні об'єкту контролю (ОК) [3]. До того ж, традиційний ультразвуковий контроль катаних виробів типу трубок незначного кругового перетину вимагають значних втрат часу на проведення дефектоскопії [4].

При цьому трубчаті вироби підвернені великому переліку можливих дефектів, що можуть виникати при

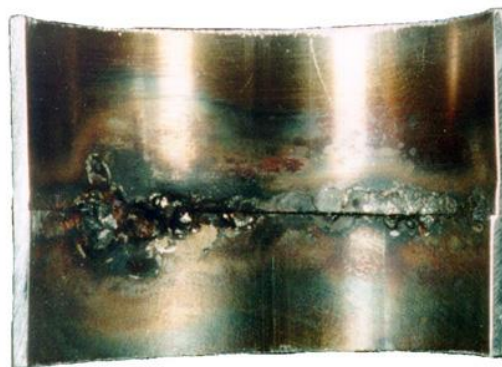
виробництві, зборці (рис. 1, б), використанні (рис. 1, а, в), та можуть проявлятися як на макро-, так і на мікрорівні (рис. 1, г).

Як показано в роботі [5] вирішити проблему можливо за рахунок використання безконтактного ультразвукового електромагнітно-акустичного (ЕМА) методу збудження та прийому ультразвукових імпульсів.

Електромагнітно-акустичний перетворювач (ЕМАП, рис. 2) – перетворювач для безконтактного збудження та прийому акустичного сигналу за допомогою електромагнітних механізмів. ЕМАП – основа методу ультразвукового неруйнівного контролю, який є особливо корисним для автоматизованого огляду, особливо в складних умовах. ЕМАП дозволяють створювати поверхневі хвилі, але вважаються недостатньо чутливими.



а



б



в



г

Рис. 1 – Дефекти металовиробів: а – металевий трубчастий виріб із значним заіржавінням внутрішньої частини; б – дефект з'єднання металевих труб; в – кородування поверхні металевого трубчастого виробу; г – дефект мікроструктури трубчастого виробу

Останню проблему можна вирішити за допомогою використання ультразвукових крутильних коливань [6].

Навіть приймаючи до уваги відносно незначний обсяг досліджень щодо можливостей ЕМАП, на

сьогодні для трубок з перетином у вигляді кола з неферромагнітного матеріалу, відповідні розробки взагалі відсутні [7]. Тому розробка методу і засобу контролю високоефективними ультразвуковими імпульсами крутильних коливань є актуальною.



Рис. 2 – Дефектоскоп з електромагнітно-акустичним перетворювачем

**Мета роботи.** Створення методу та засобу для ультразвукового ЕМА контролю імпульсами крутильних коливань трубок з круглим перетином, виготовлених з неферомагнітних металів з незначною величиною перетину.

На відмінність від випадку ультразвукового контролю виробів з феромагнітних матеріалів є проблема формування поляризованого магнітного поля в шарі ОК, виготовленого з неферомагнітного матеріалу. Цю проблему можливо вирішити для трубчатих виробів з круговим перетином. Якщо джерело поляризованого магнітного поля може формувати магнітне поле, силові лінії якого мають форму кола, то необхідно розробити його конструкцію так, щоб силові лінії колісно суміщувалися з поверхнею ОК. Суть пропозиції пояснюється з допомогою рис.3.

Викладемо сутність методу збудження ультразвукових хвиль в неферомагнітному ОК. Джерело 2 поляризованого магнітного поля розміщується в центрі виробу, що контролюється 1. При цьому джерело 2 магнітного поля необхідно виконувати у вигляді провідника постійного струму. Силові магнітні лінії 3 такого джерела мають форму кола. Розміщення джерела 2 в центрі трубчастого виробу 1 забезпечує формування поляризованого кругового магнітного поля в поверхневому шарі ОК 1.

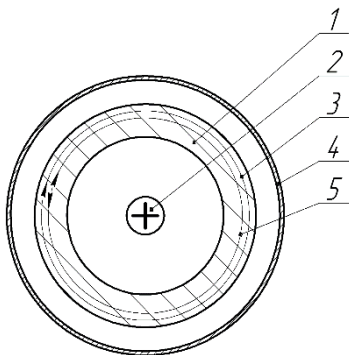


Рис.3 – Схема реалізації методу ультразвукового контролю крутильними хвилями виробу з неферомагнітного матеріалу

Для збудження ультразвукових хвиль в ОК 1 необхідно в його поверхневому шарі, одночасно з формуванням поляризованого магнітного поля, збуджувати імпульси високочастотного струму. Для цього концентрично поверхні ОК 1 розміщується котушка індуктивності 4, яка формує в поверхневому шарі виробу 1 імпульси високочастотного струму 5. Взаємодія поляризованого магнітного поля і високочастотного струму 5 в поверхневому шарі ОК 1 призводить до збудження торсійних (крутильних) ультразвукових імпульсів в виробі 1. Ультразвукові імпульси розповсюджуються вздовж виробу 1 і можуть використовуватися для дефектоскопії, визначення розмірів та фізико-механічних властивостей матеріалу ОК 1.

Прийом крутильних ультразвукових імпульсів з ОК 1 може виконуватися за рахунок зворотнього ЕМА перетворення. Коли ультразвукові коливання надходять в зону дії поляризованого магнітного поля в поверхні ОК 1 збуджуються високочастотні вихрові струми. Ці струми формують біля поверхні виробу 1 високочастотне електромагнітне поле. Високочастотне електромагнітне поле наводить в котушці індуктивності 4 ЕРС, яка несе інформацію про наявність дефектів, розміри та фізико-механічні характеристики матеріалу ОК 1.

Для реалізації розробленого методу запропоновано електромагнітно-акустичний перетворювач, який може бути використаний, наприклад, для виявлення дефектів за допомогою ультразвукових імпульсів бездисперсійних крутильних хвиль у трубчатих виробках з неферомагнітного металу. Перетин контролюємих виробів повинен мати круглий. Зовнішній діаметр ОК, які підлягають контролю, не повинні перевищувати 30...50 мм залежно від матеріалу. Внутрішній діаметр повинен мати розмір, який забезпечує розміщення дроту джерела поляризованого магнітного поля, як правило 2...3 мм.

В основу розробки ЕМАП поставлено задачу створити засіб, нове виконання якого дозволило б збуджувати і приймати крутильні бездисперсійні ультразвукові імпульси і за рахунок цього підвищити достовірність виявлення дефектів в тілі ОК.

Задача вирішується наступним чином. В електромагнітно – акустичному перетворювачі [8] для контролю трубчатих неферомагнітних металовиробів з перетином у вигляді кола, що має корпус, джерело постійного магнітного поля, прохідну високочастотну котушку індуктивності та протектор, прохідна високочастотна котушка індуктивності виконана з двох секцій, які електрично включені по відношенню одна до одної зустрічно по магнітному полю, а джерело постійного магнітного поля виконано у вигляді окремого провідника, який встановлено у внутрішньому об'ємі трубчастого виробу так, що його вісь співпадає з віссю трубчастого виробу.

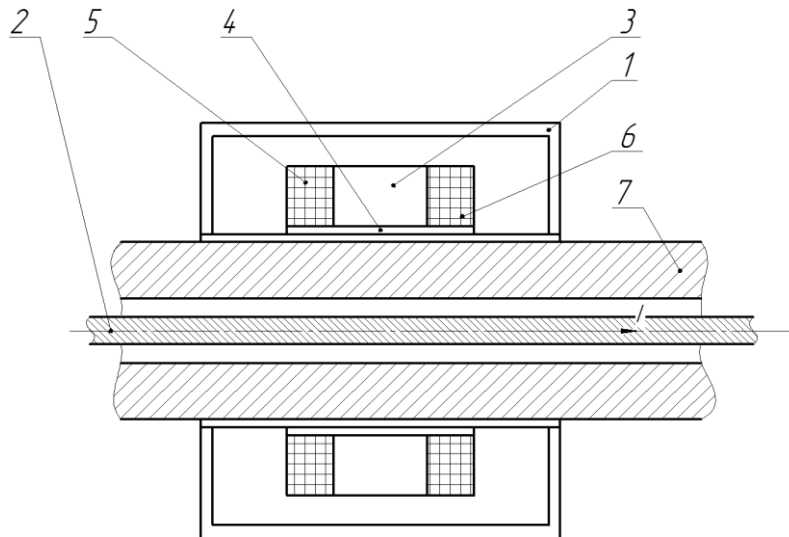


Рис. 4 – Ескіз електромагнітно-акустичного перетворювача для контролю трубчатих ферромагнітних металовиробів з перетином у вигляді кола [8]

На рис. 4 позначено: 1 – корпус; 2 – джерело постійного магнітного поля у вигляді окремого провідника; 3 – прохідна високочастотна котушки індуктивності; 4 – протектор; 5 – перша секція прохідної високочастотної котушки індуктивності; 6 – друга секція прохідної високочастотної котушки індуктивності; 7 – ОК;  $I$  – постійний електричний струм.

ЕМАП працює наступним чином. У порожнині трубчатого виробу 7, співвісно з ним, розташований провідник 2, по якому протікає постійний електричний струм  $I$ . Струм  $I$  в провіднику 2 є в тілі ОК 7 джерелом постійного поляризованого магнітного поля, вектор напруженості якого в циліндричній системі координат має один круговий компонент. Прокідна високочастотна котушки 3 індуктивності закріплена в корпусі 1 і живиться високочастотним струмом. Високочастотний струм в секції 5 і в секції 6 високочастотної котушки 3 індуктивності відносно один одного протилежні за напрямком. За рахунок взаємодії магнітного поляризованого поля кругової форми, що формується струм  $I$  в ОК 7, і високочастотного електромагнітного поля, що формується секціями 5 і 6 високочастотної котушки 3 індуктивності та дії сили Лоренца в тілі ОК 7 збуджуються зсувні деформації. В результаті в ОК 7 розповсюджуються крутильні бездисперсійні ультразвукові коливання. При наявності в ОК 7 дефектів ультразвукові коливання відбиваються від них і фіксуються за рахунок ефекту електромагнітної індукції. Протектор 4 захищає високочастотну котушки 3 індуктивності від пошкодження при скануванні ОК.

Перевірка розробленого методу та ЕМА перетворювача виконана на відрізку труби діаметром 32 мм з товщиною 3,2 мм, виготовленої зі сталі ст.3. У вірці для дослідження було виконано поздовжню модель дефекту глибиною 0,2 мм та довжиною 20 мм. Джерело живлення виготовлено з мідного дроту діаметром 2,4 мм. Живлення джерела магнітного поля виконувалося імпульсами струму прямокутної форми

часової тривалістю 1 ms. Сила струму складала близько 2000 А. Секції котушки індуктивності намотані дротом діаметром 0,2 мм і мають по 16 витків кожна. Кількість секцій – 8 шт. Високочастотна котушка індуктивності ЕМАП живилася від генератора зондуючи імпульсів струмом з піковим значенням до 200 А, часовою тривалістю від 1 до 10 періодів частоти заповнення, яка регулювалася в інтервалі 0,1–1,5 МГц. В результаті досліджень виявлялася модель дефекту з відношенням амплітуд відбитого сигналу та шуму 7-8 разів.

Таким чином, технічним результатом розробки є те, що ЕМА перетворювач даної конструкції має достатню високу здатність до виявлення дефектів. В результаті достовірність ультразвукового контролю трубчатих ферромагнітних металовиробів буде підвищуватися.

#### Список літератури

1. Патон Б. Є., Троїцький В. О., Посипайко Ю. М. *Неруйнівний контроль в Україні*. Інформ. бюл. Українського товариства неруйнівного контролю та технічної діагностики. –2003. –№ 2(18). – С. 5–9.
2. *Незрушаючий контроль: Справочник: В 7 т.* Под общ. ред. В.В. Клоева. Т.3: Ультразвуковой контроль / И.Н. Ермолов, Ю.В. Ланге. М.: Машиностроение, 2004. 864 с.
3. Плєснецов С.Ю., Сучков Г.М., Корж А.И., Суворова М.Д. Новые теоретические исследования и разработки в области электромагнитно-акустического преобразования. (Обзор) // *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*. 2018. №2. С. 24–31.
4. Ноздрачова К.Л. *Експрес- метод ультразвукового контролю довгомірних виробів*. Дис. к.т.н. НТУ «ХПІ», Харків, 2011. 179 с.
5. Сучков Г.М. Развитие теории и практики создания приборов для электромагнитно – акустического контроля металлоизделий. Дис. д.т.н. НТУ «ХПІ», Харків, 2005. 521 с.
6. Plesnetsov S.Yu., Petrishchev O.N., Mygushchenko R.P., Suchkov G.M. Simulation of electromagnetic-acoustic conversion process under torsion waves excitation. part 3. // *Технічна електродинаміка*. 2018. №3. С. 10–19.
7. Сучков Г.М., Плєснецов С.Ю., Мещеряков С.Ю., Юданова Н.Н. Новые разработки электромагнитно-акустических преобразователей (обзор) // *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*. 2018. №3. С.10.
8. Плєснецов С.Ю., Петрищев О.М., Сучков Г.М., Мітін О.В. Электромагнитно-акустичний перетворювач для контролю трубчатих ферромагнітних металовиробів з перетином у вигляді кола. Україна. Патент на корисну модель №117766. 2017.

## References (transliterated)

1. Paton B. Je., Trojicjkyj V. O., Posypajko Ju. M. *Nerujnivnyj kontrolj v Ukrajinі* [Nondestructive testing in Ukraine]. Inform. bjul. Ukrajinjskogo tovarystva nerujnivnogho kontrolju ta tekhnichnoji diaghnostyky. 2003.No 2(18). P. 5–9.
2. Y.N. Ermolov, Ju.V. Langhe. *Nerazrushajushhyj kontrolj: Spravochnyk: V 7 t.* [Nondestructive testing: Handbok. In 7 volumes] Ed. V.V. Kljuev. T.3: *Ul'trazvukovoj kontrolj* [Volume 3. Ultrasonic testing] /. Moscow: Mashynostroenye, 2004. 864 p.
3. Plesnecov S.Ju., Suchkov Gh.M., Korzh A.Y., Suvorova M.D. *Novye teoretycheskye yssledovanyja y razrabotky v oblasti elektromagnhnytno-akustycheskogho preobrazovanyja. (Obzor)* [New theoretical research in the area of electromagnetic-acoustic transduction (Review)]. Tekhnicheskaja dyaghnostyka y nerazrushajushhyj kontrolj. 2018. No2. P. 24–31.
4. Nozdrachova K. L. *Ekspres – metod ul'trazvukovogo kontrolyu dovgomirnyh vyrobiv: dys. kand. tehn. nauk* [Express-method of elongated product ultrasonic testing. PhD dissertation]. 05.11.13. – Kharkiv, 2011.
5. Suchkov Gh.M. *Razvytye teoryy y praktyky sozdanyja pryborov dlja elektromagnhnytno – akustycheskogho kontrolja metalloyzdebyj* [Development of theory and practice of metal product electromagnetic-acoustic testing device creation]. D.t.s. diss. NTU «KhPI», Kharkiv, 2005. 521 p.
6. Plesnetsov S.Yu., Petrishchev O.N., Mygushchenko R.P., Suchkov G.M. *Simulation of electromagnetic-acoustic conversion process under torsion waves excitation. Part 3.* Tekhnichna elektrodynamika. 2018. No3. P. 10–19.
7. Suchkov Gh.M., Plesnecov S.Ju., Meshherjakov S.Ju., Judanova N.N. *Novye razrabotky elektromagnhnytno-akustycheskykh preobrazovatelej (obzor)* [New developments in production of electromagnetic-acoustic transducers (review)]. Tekhnicheskaja dyaghnostyka y nerazrushajushhyj kontrolj. 2018. No3. P.10.
8. Plesnetsov S.Yu., Petryshhev O.M., Suchkov G.M., Mitin O.V. *Elektromagnhnytno – akustychnyj peretvorjuvach dlja kontrolju trubchatykh neferomagnhnytnykh metalovyrobiv z peretynom u vyghljadi kola. Ukrajinа. Patent na korysnu modelj* [Electromagnetic-acoustic transducer for testing of tubular nonferromagnetic metal product of circular section. Patent on useful model]. No 117766. 2017.

Надійшла (received) 27.10.2018

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

**Плеснецов Сергій Юрійович (Плеснецов Сергей Юрьевич, Plesnetsov Sergey Yurievich)** – кандидат технічних наук, докторант каф. КРСКД НТУ «ХПІ»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8428-5426>; e-mail: [s.plesnetsov@gmail.com](mailto:s.plesnetsov@gmail.com)



УДК 621.7.016

*М. В. ПОДКОЛЗИН, В. И. КУЗЬМЕНКО, В. Н. ЛЕВЧЕНКО, Е. А. КУЗЬМЕНКО, Н. В. БИБА***ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА И РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ГОРЯЧЕЙ ОБЪЕМНОЙ ШТАМПОВКИ ЗАГОТОВОК КОЛЕЦ ПОДШИПНИКОВ**

Предложена новая технология получения заготовок для подшипниковых колец путем штамповки по типу «Башня» на кривошипном горячештаповочном прессе. Численное моделирование операций осадки и штамповки в закрытом ручье нагретой поковки выполнено методом конечных элементов с использованием специализированного программного пакета QForm. В процессе моделирования решены задачи расчета распределения температурных полей в заготовке в зависимости от времени для обеих операций. Показано, что одним из определяющих факторов для этих операций штамповки является температура заготовки. Расчеты проводили для температурного интервала начала штамповки в пределах 850...1150°C. Определено, что значения усилий при нагреве заготовки подшипниковых колец до температуры начала штамповки  $T = 850^\circ\text{C}$  превышают значения усилий, полученных при ее нагреве до температуры начала штамповки  $T = 1150^\circ\text{C}$  на 6,3%, что может привести к заклиниванию преса и поломке штампов. Проанализировано влияние начальной температуры нагрева заготовки на ее формоизменение и заполнение окончательного ручья штампа. Результаты расчетов показали, что при температурах начала штамповки ниже 1150°C возможна недоштаповка поковки в окончательном ручье. Также решена задача конечного формоизменения при штамповке заготовки подшипниковых колец, рассчитаны усилия по операциям как функции времени. Численное моделирование позволило определить оптимальные размеры заготовки после предварительной операции осадки и получить поковку с заполнением окончательного ручья по вершинам и без дефектов. По результатам выполненных расчетов разработан процесс горячей штамповки на кривошипном горячештаповочном прессе усилием 16 МН в закрытых штампах за два перехода. Особенность представленной технологии заключается в том, что заготовки для внутреннего и наружного колец подшипников получают одновременно. Для реализации процесса штамповки разработаны конструкции штампов. На Лозовском кузнечно-механическом заводе (г. Лозовая, Харьковская область) провели проверку результатов. Опробование разработанного технологического процесса в промышленных условиях подтвердило его эффективность.

**Ключевые слова:** горячая объемная штамповка, подшипниковое кольцо, осадка, температура нагрева, моделирование, метод конечных элементов, штамп.

*М. В. ПОДКОЛЗИН, В. І. КУЗЬМЕНКО, В. М. ЛЕВЧЕНКО, О. О. КУЗЬМЕНКО, М. В. БІБА***ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ТА РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ГАРЯЧОГО ОБ'ЄМНОГО ШТАМПУВАННЯ ЗАГОТОВОК КІЛЕЦЬ ПІДШИПНИКІВ**

Запропоновано нову технологію одержання заготовок для підшипникових кілець шляхом штампування по типу «Вежа» на корбовому горячештапувальному пресі. Чисельне моделювання операцій осаджування і штампування в закритому ривчаку нагрітої поковки виконано методом скінчених елементів з використанням спеціалізованого програмного пакета QForm. В процесі моделювання вирішено завдання розрахунку розподілу температурних полів в заготовці в залежності від часу для обох операцій. Показано, що одним з визначальних чинників для цих операцій штампування є температура заготовки. Розрахунки проводили для температурного інтервалу початку штампування в межах 850...1150°C. Визначено, що значення зусиль при нагріванні заготовки кілець підшипника до температури початку штампування  $T = 850^\circ\text{C}$  перевищують значення зусиль, отриманих при її нагріванні до температури початку штампування  $T = 1150^\circ\text{C}$  на 6,3%, що може привести до заклинивання преса і поломки штампів. Проаналізовано вплив початкової температури нагріву заготовки на її формозміну та заповнення остаточного ривчака штампа. Результати розрахунків показали, що при температурах початку штампування нижче 1150°C можливе недоштамування поковки в остаточному ривчаку. Також вирішено задачу кінцевої формозміни при штампуванні заготовки підшипникових кілець, розраховані зусилля за операціями як функції часу. Чисельне моделювання дозволило визначити оптимальні розміри заготовки після попередньої операції осаджування і отримати поковки із заповненням остаточного ривчака по вершинах та без дефектів. За результатами виконаних розрахунків розроблено процес гарячого штампування на корбовому горячештапувальному пресі зусиллям 16 МН в закритих штампах за два переходи. Особливість представленої технології полягає в тому, що заготовки для внутрішнього і зовнішнього кілець підшипників отримують одночасно. Для реалізації процесу штампування розроблено конструкції штампів. На Лозівському ковальсько-механічному заводі (м. Лозова, Харківська область) провели перевірку результатів моделювання. Випробування розробленого технологічного процесу в промислових умовах підтвердило його ефективність.

**Ключові слова:** гаряче об'ємне штампування, підшипникове кільце, осаджування, температура нагрівання, моделювання, метод скінчених елементів, штамп.

*М. V. PODKOLZIN, V. I. KUZMENKO, V. M. LEVCHENKO, O. O. KUZMENKO, M. V. BIBA***THE RESEARCHING OF THE PROCESS AND DEVELOPMENT OF THE TECHNOLOGY OF HOT VOLUME STAMPING OF BEARINGS RINGS WORKPIECES**

The new technology of producing workpieces of bearing rings by stamping technology of the «Tower» type on the crank hot forging press has been proposed. The numerical simulations of the setting and stamping operations in closed groove of the heated forging was performed using the finite element method applying the specialized software package QForm. The tasks of calculating distribution of temperature fields in the workpiece depending on the time for both operations were solved in the process of modeling. It is shown that one of the determining factors for these stamping operations is temperature of the workpiece. The calculations for the temperature range of beginning of stamping within 850...1150°C were carried out. It was determined that the force values for heating of the workpiece of the bearing rings to the temperature of the beginning of stamping  $T = 850^\circ\text{C}$  exceed the values of the forces obtained when its heating to the temperature of the beginning of stamping was  $T = 1150^\circ\text{C}$  by 6.3% that may lead to jamming of the press and breakdown of the dies. The influence of the initial heating temperature of the workpiece on the its forming and filling up of the final groove of the stamp is analyzed. The results of the calculations showed that at the temperatures of the beginning of stamping below 1150°C the short stamping of the workpiece in the final groove is possible. Also, the task of final forming for the bearing rings workpiece stamping was solved and the operation forces as the functions of time were calculated. The numerical simulations made it possible to calculate the optimal dimensions of the workpiece after the preliminary operation of setting and to obtain the forging with the filling of the final groove along the tops and without defects. According to the results of the calculations the hot stamping process in closed dies in two operations for the 16 MN crank hot forging press was developed. The feature of the presented technology lies in the fact that workpieces for the inner and outer rings of bearings are obtained simultaneously. The dies design for the implementation of the stamping process have been developed. The simulation results were tested in the Lozivsky forging-mechanical plant (Lozova, Kharkiv region). The developed process approbation in the industrial environment confirmed its effectiveness.

**Keywords:** hot volume stamping, bearing ring, setting, heating temperature, simulation, finite element method, die.

© М. В. Подколзин, В. И. Кузьменко, В. Н. Левченко, Е. А. Кузьменко, Н. В. Биба, 2018



**Введение.** В сложившихся экономических условиях для наиболее полного удовлетворения спроса предприятия вынуждены постоянно расширять номенклатуру производимой продукции и совершенствовать технологию её изготовления. Одним из основных путей совершенствования технологии изготовления деталей в машиностроении является максимально возможная замена процессов резания на обработку давлением, в том числе горячую объёмную штамповку с широким использованием прогрессивных методов нагрева, средств механизации и автоматизации. Например, при изготовлении колец подшипников рационально перейти от точения из трубной заготовки к их изготовлению из поковок, полученных с использованием технологии горячей объёмной штамповки.

При освоении нового типа подшипника необходимо выполнять сложные расчёты переходов штамповки, параметров исходной заготовки, режимов нагрева, а также спроектировать штамповую оснастку. До последнего времени в основе технологии горячей штамповки лежал нагрев в пламенных печах и раздельная штамповка наружного и внутреннего колец подшипника, что приводило к необоснованно высоким затратам энергии, металла и высокой трудоёмкости изготовления колец подшипников. Сейчас используют преимущественно индукционный нагрев, но штамповка наружного и внутреннего колец подшипника остается раздельной. Кроме того, расчет технологии процесса штамповки, а также последующее проектирование штампов для ее реализации осуществляется только на основе эмпирических данных, что приводит к многочисленным ошибкам и необходимости последующей доработки технологии.

**Анализ последних исследований и литературы.** Основными операциями технологического процесса производства подшипниковых колец являются: индукционный нагрев заготовки, горячая штамповка, разделение и раскатка колец. При этом применяются штамповка на горизонтально-ковочных машинах, ковка и штамповка на молотах, штамповка на прессах и горячештамповочных автоматах, радиальная и радиально-осевая раскатка на раскаточных машинах. В многочисленных работах рассмотрены различные аспекты технологии производства колец: расчёт параметров индукционного нагрева заготовок [1, 2], влияние температуры нагрева заготовки на процесс штамповки подшипникового кольца [3], формирование и распределение волокон в поковке [4–6], моделирование и оптимизация параметров раскатки колец [7, 8].

Ковку применяют для получения заготовок колец в виде крупных поковок, а также в условиях единичного или мелкосерийного производства, когда их изготовление другими методами нецелесообразно. Например, на горизонтально-ковочных машинах изготавливают заготовки колец в диапазоне от 40 до 240 мм по наружному диаметру и массе от 0,2 до 15 кг

в условиях мелкосерийного и массового производства [9].

Штамповка кольцевых заготовок на молотах имеет сравнительно ограниченное распространение вследствие невысокой точности и относительно больших кузнечных припусков [9].

В условиях крупносерийного и серийного выпуска заготовок колец с наружным диаметром от 50 до 160 мм широко используется штамповка на многопозиционных горячештамповочных автоматах, а для колец с наружным диаметром от 70 до 300 и массой от 0,2 до 20 кг – на полуавтоматических горячештамповочных линиях [9].

Радиальная и радиально-осевая раскатка позволяет получать кольца с наружным диаметром от 75 мм до 8 м, высотой от 15 мм до 2 м и массой от 0,4 кг до 82 т [10–12].

Данная работа посвящена совершенствованию технологии штамповки путём получения заготовок обоих колец в одной поковке типа «Башня» с последующим их разделением и раскаткой. Для создания рационального техпроцесса осуществили математическое моделирование горячей штамповки подшипникового кольца путем решения термопластической задачи с учетом больших деформаций и скоростей деформаций. Полная математическая модель включает в себя систему уравнений закона сохранения массы, энергии и момента количества движения, условия неразрывности, нелинейные физические уравнения, зависящие от деформаций, скоростей деформаций и температуры, условий контакта [4].

Данная работа посвящена совершенствованию технологии штамповки путём получения заготовок обеих колец в одной поковке «Башня» с последующим их разделением и раскаткой.

Целью данной работы является усовершенствование технологии горячей объёмной штамповки в закрытых штампах по типу «Башня» комплектных подшипниковых колец на основе численного моделирования процесса горячей штамповки с использованием программного комплекса QForm.

**Численная реализация и результаты.** Моделирование горячей штамповки проходит в два этапа: на первом нагретая в индукционном нагревателе заготовка до определенной температуры осаживается в предварительном ручье, на втором – перекалывается в чистовой ручей и штампуется за один ход прессы. В работе проводилось численное моделирование методом конечных элементов контактной пластической задачи при различной высоте осадки исходной заготовки и штамповки её в чистовом ручье при разных показателях температуры нагрева заготовки.

В качестве исходных данных для моделирования горячей штамповки использовались предварительно рассчитанные и построенные в программе КОМПАС-3D штампы (рис. 1 и 2) и заготовка (рис. 3).

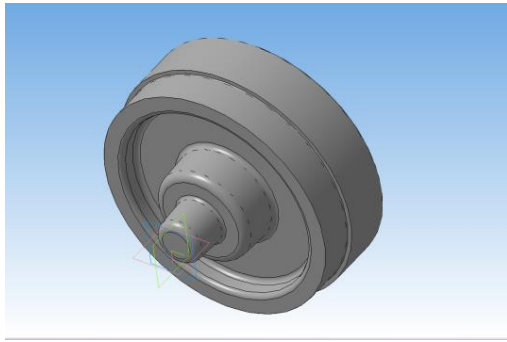


Рис. 1 – Штамп верхний (инструмент 1)

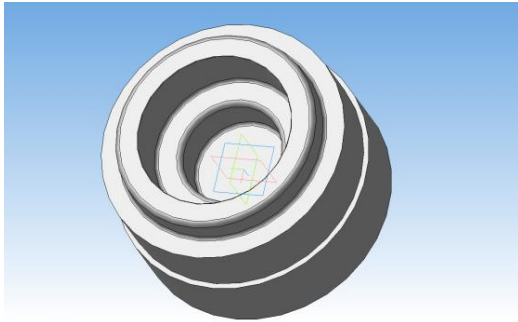


Рис. 2 – Штамп нижний (инструмент 2)

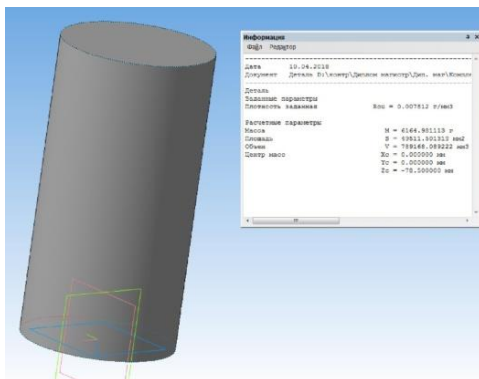


Рис. 3 – Заготовка для штамповки колец

Материал заготовки – сталь ШХ15, ее диаметр – 80 мм, высота –  $h = 157$  мм. Коэффициент трения принимали равным  $\mu = 0,3$ . Для решения поставленной задачи была выбрана температура нагрева заготовки: начала ковки  $1150^{\circ}\text{C}$  и конца ковки  $850^{\circ}\text{C}$ .

Для решения задачи нагрева и пластического формоизменения в пакете QForm задают граничные условия: во вкладке «Параметры заготовки» указывают материал, начальную температуру и другие параметры заготовки; во вкладке «Параметры инструмента» указывают приводы инструментов, смазку между заготовкой и инструментами, материал, начальную температуру и другие параметры инструментов, а на всех контактирующих поверхностях задают условия трения (в данном случае по закону Зибеля). Для первой операции осадки движения задают для параметра «Инструмент 1» – механический пресс 16 МН, параметра «Инструмент 2» – неподвижный привод. Во вкладке «Условия остановки» задаем «Ход Инструмента 1» (100 мм), и в

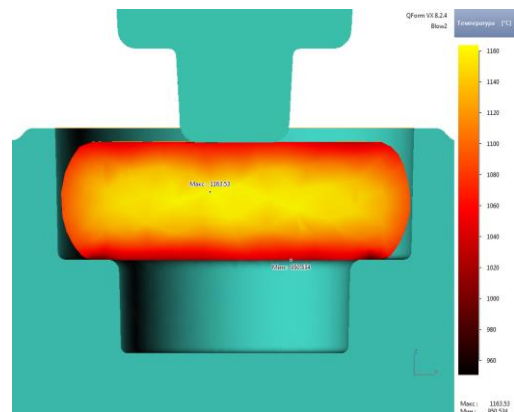
«Граничные условия» – время охлаждения на воздухе и в инструменте.

После завершения расчета, во вкладке «Проект» добавляли операцию в цепочку – штамповка в чистовом ручье, где заменяли геометрию, а параметры осаженой заготовки наследовались из предыдущей операции: материал, форма заготовки, температура и накопленная деформация. Во вкладке «Условия остановки» задавали параметры «Ход Инструмента 1» (87,8 мм), а в «Граничные условия» – время охлаждения на воздухе и в инструменте.

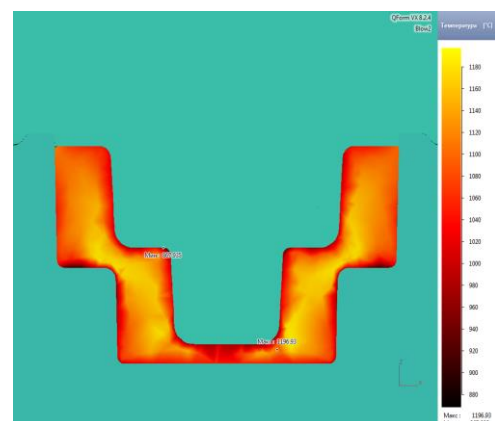
В процессе моделирования проводили ряд численных экспериментов, в которых подвергали изменению как высоту осадки, полученную после первой операции, так и температуру нагрева заготовки.

Было принято решение провести моделирование штамповки комплектной поковки «Башня» при различных температурах нагрева заготовок:  $1150^{\circ}\text{C}$ ,  $1075^{\circ}\text{C}$ ,  $950^{\circ}\text{C}$  и  $850^{\circ}\text{C}$ . В результате выполненных в пакете QForm расчетов было установлено, что нагрев заготовки оказывает существенное влияние на характер течения металла.

Для штамповки в окончательном ручье использовали заготовку после осадки диаметром 142 мм (рис. 4).

Рис. 4 – Осаженная до  $\varnothing 142$  мм заготовка в чистовом ручье

По результатам численного эксперимента получили заполнение поковки, при этом не образовалось зажима и незаполнения (рис. 5).

Рис. 5 – Конец штамповки при температуре  $1150^{\circ}\text{C}$

На рис. 6 представлены полученные поля температур в цилиндрической заготовке подшипникового кольца после индукционного нагрева для стали ШХ15, с учетом времени переноса от печи к штампам – 10 с и остывания заготовки на инструменте – 4 с.

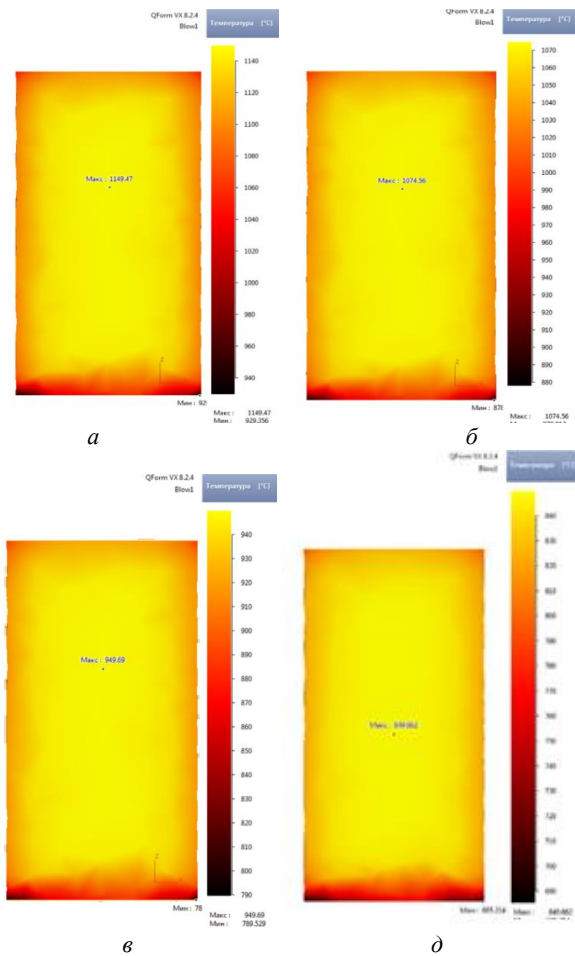


Рис. 6. Распределение температур в цилиндрической заготовке: *а* – 1150°C; *б* – 1075°C; *в* – 950°C; *д* – 850°C

Расчетные поля температур в поковке подшипникового кольца при различной температуре нагрева после осадки показаны на рис. 7.

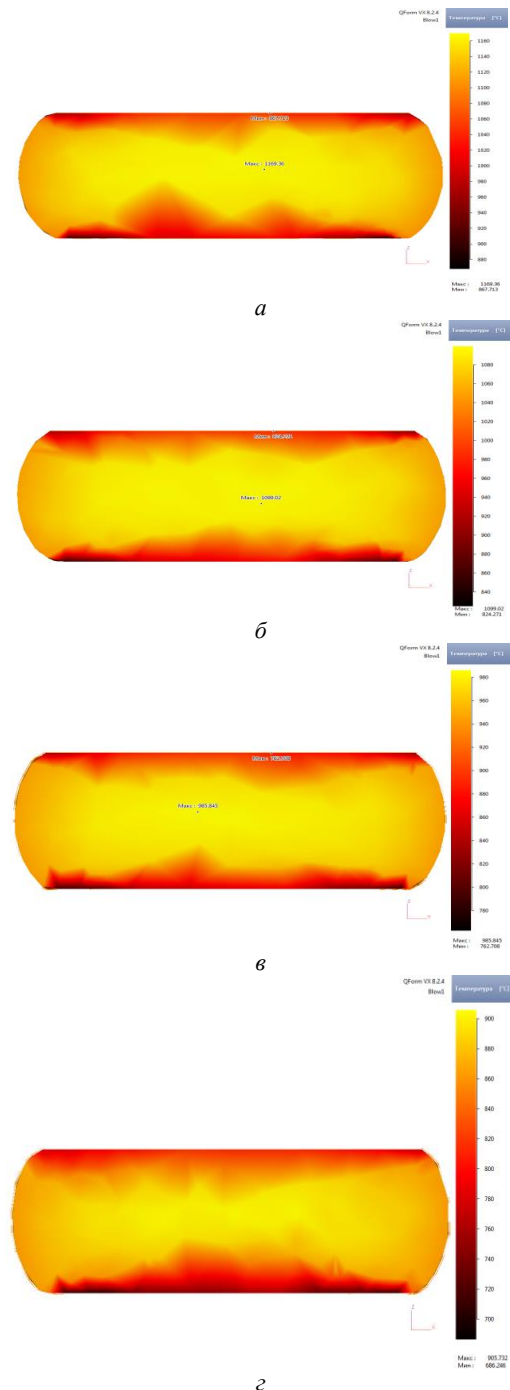


Рис. 7 – Распределение температур в поковке после осадки в зависимости от температуры предварительного нагрева: *а* – 1150°C; *б* – 1075°C; *в* – 950°C; *г* – 850°C

Решение задачи теплопроводности при осадке для различных начальных значений температур штамповки позволило получить распределения температуры в поковке на момент ее помещения в окончательный ручей. А решение контактной задачи дало возможность определить усилие необходимое при осадке для рассматриваемых вариантов предварительного нагрева заготовки.

На рис. 8 представлен график изменения усилия от перемещения инструмента в операции осадки после нагрева заготовки до различных температур.

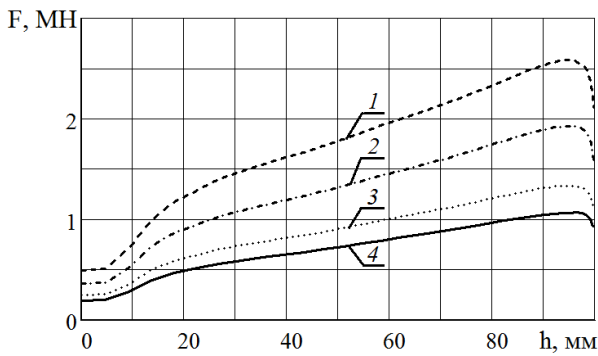


Рис. 8 – График зависимости усилия от хода инструмента в процессе осадки при нагреве заготовки до температуры: 1 – 850°C; 2 – 950°C; 3 – 1075°C; 4 – 1150°C

На втором этапе технологического процесса осуществляется штамповка в закрытом штампе за один ход пресса. Данная операция штамповки является наиболее энергозатратной. На ней проводится штамповка предварительно осажженной горячей заготовки, полученной после операции осадки. Температурное поле, условия смазки, коэффициент трения наследовали из предыдущей операции.

Графики зависимости усилия от перемещения для операции штамповки в чистовом ручье комплектной поковки по типу «Башня», нагретой до различных температур представлены на рис. 9.

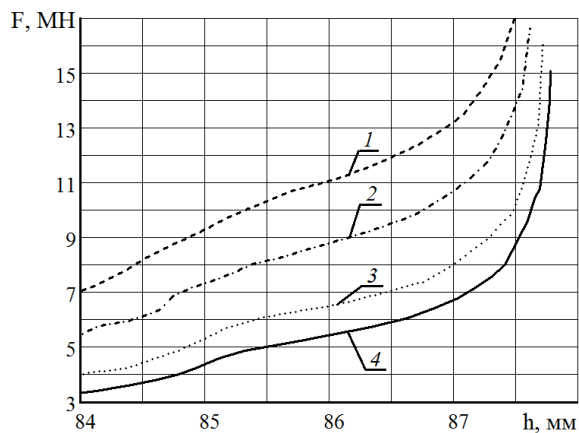
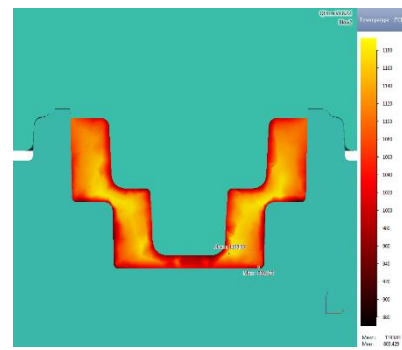
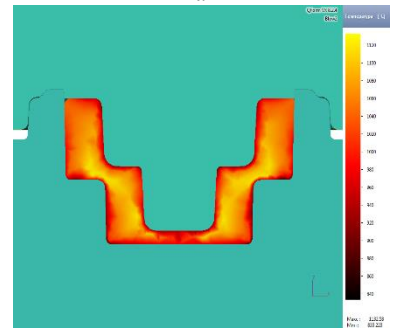


Рис. 9 – График зависимости усилия от хода инструмента при штамповке в чистовом ручье для поковки, нагретой до температуры: 1 – 850°C; 2 – 950°C; 3 – 1075°C; 4 – 1150°C

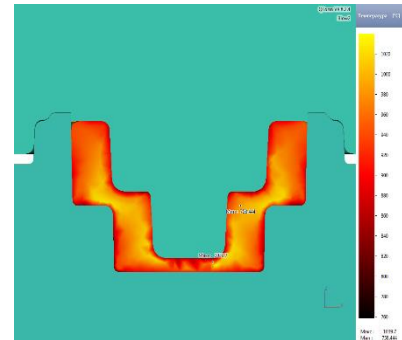
Из рис. 10, на котором показана поковка в чистовом ручье закрытого штампа на окончательной стадии штамповки, видно, как температура нагрева заготовки влияет на характер течения металла и на заполнение полости ручья.



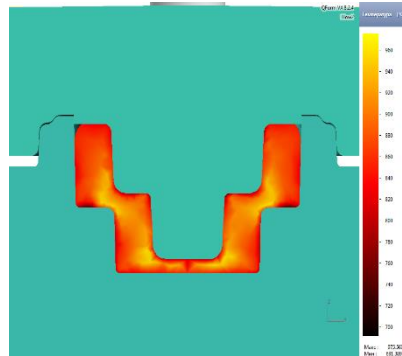
a



б



в



г

Рис. 10 – Поковка в чистовом ручье на окончательной стадии штамповки при начальной температуре нагрева: а – 1150°C; б – 1075°C; в – 950°C; г – 850°C

Анализ графиков изменения усилий, полученных при моделировании операций осадки и штамповки в чистовом ручье, показал, что начальный нагрев заготовки значительно влияет на решения термопластической задачи. Значения усилий при нагреве заготовки до температуры конца штамповки  $T = 850^\circ\text{C}$  превышают значения усилий, полученных при нагреве заготовки колец подшипника до температуры начала штамповки  $T = 1150^\circ\text{C}$ , в среднем



на 6,25%, что приводит к недоштамповке поковки в окончательном ручье на величину 1,9 мм (рис. 10, з).

Из рис. 10, а видно, что поковка, отштампованная из заготовки, нагретой до температуры 1150°C, заполняется полностью, не формируются зажим и заусенец, и, следовательно, объем заготовки рассчитан правильно, что весьма важно для безоблойной штамповки. Что касается поковок, представленных на рис. 10, б и в, то можно увидеть небольшое незаполнение по наружному диаметру поковки, однако этот дефект не является браком, так как в последствии после разделения поковки проведут раскатку и калибровку по диаметру и высоте. Усилие штамповки увеличивается с понижением температуры нагрева заготовки (см. рис. 9). На рис. 10, з можно увидеть недоштамповку и незаполнение по наружному диаметру поковки при температуре нагрева заготовки 850°C. Усилие на инструменте превышает допустимое (см. рис. 9), что на практике может привести к заклиниванию прессы и поломке штампов.

Отсюда следует, что чем выше температура нагрева заготовки, тем интенсивней течет металл, и как следствие, лучше происходит заполнение даже в закрытых штампах, где металл деформируется в условиях всестороннего неравномерного сжатия при больших сжимающих напряжениях, позволяющих штамповать малопластичные сплавы.

Анализ изменения температурных полей и значений усилий на инструменте при осадке и штамповке в окончательном ручье показал необходимость учета технологической наследственности в виде температурного поля и напряженно-деформированного состояния при моделировании технологических операций изготовления поковок подшипниковых колец.

На Лозовском кузнечно-механическом заводе (ЛКМЗ) провели проверку результатов моделирования в промышленных условиях на реальных поковках из стали ШХ15. Получили поковку (рис. 11) с заполнением ручья по вершинам и без дефектов. Штамповку выполняли на кривошипном горячештамповочном прессе с номинальным усилием 16 МН с последующим разделением комплектной поковки типа «Башня» на заготовки для внутреннего и наружного подшипниковых колец и раскаткой на раскаточной машине МГР-250.

**Выводы.** В работе проведено численное моделирование операций технологического процесса получения заготовки для подшипниковых колец: осадки и штамповки в чистовом ручье.

Описан технологический процесс изготовления комплектной поковки подшипниковых колец по типу «Башня», включающий нагрев исходной заготовки из стали ШХ15 до температуры начала штамповки и последующее пластическое деформирование на операциях осадки и закрытой штамповки в окончательном ручье.

Численно решена связанная контактная термопластическая задача методом конечных элементов с использованием специализированного программного комплекса QForm.

В ходе вычислительных экспериментов определены оптимальные размеры заготовки после предварительной операции осадки, что позволило отштамповать поковку с заполнением окончательного ручья по вершинам и без дефектов.



Рис. 11 – Комплектная поковка типа «Башня», отштампованная на ЛКМЗ

Результаты исследований позволили получить благоприятные параметры технологического процесса для изготовления комплектных поковок подшипниковых колец по типу «Башня» уже на этапе проектирования.

#### Список литературы

1. 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 «ХП». Серія: Динаміка і міцність машин. – Х.: НТУ «ХП», – 2016. – № 26 (1198). – С. 50-53.
2. Плешивцева Ю. Э. Оптимальное по быстродействию и энергопотреблению управление периодическим процессом индукционного нагрева металла / Ю. Э. Плешивцева, А. В. Попов, А. И. Дьяконов. // Альманах современной науки и образования. 2013. №2 (69) С.135-142.
3. Автономова Л. В. Моделирование процесса объемной штамповки подшипникового кольца / Л. В. Автономова, Е. Д. Грозенок, Э. А. Симсон, А. В. Степук // Вісник НТУ «ХП». Серія: Транспортне машинобудування. – Х.: НТУ «ХП», 2017. – № 14 (1336). – С. 135–139.
4. Симсон Э. А. Формирование волокнистой структуры поковок колец, обеспечивающее долговечность подшипниковых узлов сельскохозяйственной техники / Э. А. Симсон, Л. В. Автономова, Е. Д. Грозенок // Інженерія природокористування. – 2016. – № 2 (6). – С. 89–93.
5. Грозенок Е. Д. 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 «ХП». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Х.: НТУ «ХП», 2016. – № 30 (1202). – С. 32–36.
6. Автономова Л. В. Исследование распределения волокнистой структуры поковки подшипникового кольца при горячей штамповке / Л. В. Автономова, Е. Д. Грозенок, А. В. Степук // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х.: НТУ «ХП», 2016. – № 33 (1205). – С. 69–73.
7. Автономова Л. В. Моделирование процесса горячей раскатки колец подшипника / Л. В. Автономова, Е. Д. Грозенок, Э. А. Симсон // Вестник Нац. техн. ун-та «ХПИ»: сб. науч. тр. Темат. вып.: Технологии в машиностроении. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2015. – № 4 (1113). – С. 158–161.
8. Автономова Л. В. Имитационное моделирование процесса холодной раскатки колец подшипника с учетом

- температурного фактора / Л. В. Автономова, Е. Д. Грозенюк // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2014. – № 4(7). – С. 4-89.
9. Белокуров О. А. Разработка методики проектирования технологического процесса штамповки кольцевых поковок с направленным волокнистым строением : дис. ... канд. техн. наук. Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. 204 с.
  10. Eruç E., Shivpuri R. A summary of ring rolling technology–II. Recent trends in process modeling, simulation, planning, and control // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 1992. Vol. 32. № 3. P. 399–413.
  11. Томило В. А. Современные технологии изготовления крупногабаритных кольцевых заготовок / В. А. Томило, В. В. Левкович // ГНУ «Физико-технический институт» НАН Беларуси-2012.– №3(66). – С.110–114.
  12. Wanga Z. W. Complete modeling and parameter optimization for virtual ring rolling / Z. W. Wang, J. P. Fan, D. P. Hu, C. Y. Tang, C. P. Tsui // International Journal of Mechanical Sciences. – 2010. – Vol. 52, iss. 10. – P. 1325–1333.
- References (transliterated)**
1. Grozenok E. D., Simson E. A., Stepuk A. V., Shergin S. Yu. Chislennoe modelirovanie temperaturnogo polya zagotovok pri induktsionnom nagreve dlya izgotovleniya podshipnikoviyh kolets [Numerical modeling of the temperature field in billets during induction heating for bearing rings manufacturing]. Visnik NTU «KhPI». Seriya: Dinamika i mitsnist mashin. Kharkiv, NTU «KhPI», 2016. No 26 (1198). P. 50–53.
  2. Pleshivtseva Yu. E. Optimal in terms of speed and power consumption control of the periodic process of induction heating of a metal / Yu. E. Pleshivtseva, A. V. Popov, A. I D'yakonov. // Almanac of modern science and education. 2013. No2 (69) P. 135–142.
  3. Avtonomova L.V., Grozenok Ie. D., Simson E. A., Stepuk A. V. Modelirovanie protsessa ob'emnoy shtampovki podshipnikovogo koltsa [Modeling the process of the bearing ring bulk stamping]. Visnik NTU «KhPI». Seriya: Transportne mashinobuduvannya, Kharkiv.: NTU «KhPI», 2017. No. 14 (1336). P. 135–139.
  4. Simson E. A., Avtonomova L. V., Grozenok Ie. D. Formirovanie voloknistoy strukturyi pokovok kolets, obespechivayuschee dolgovechnost podshipnikoviyh uzlov selskohozyaystvennoy tehniki [Forming the fibrous structure of ring forgings to provide durability of bearing units for agricultural machinery]. Inzheneriya prirodokoristuvannya, 2016. No. 2 (6). PP. 89–93.
  5. Grozenok Ie. D., Simson E. A., Stepuk A. V., Shergin S. Yu. Vliyaniye treniya na raspredeleniye voloknistoy strukturyi pokovki podshipnikovogo koltsa pri goryachey shtampovke [Distribution of the fibrous structure in bearing rings during hot stamping]. Visnik NTU «KhPI». Seriya: Innovatsiyni tehnologiyi ta obladnannya obrobki materialiv u mashinobuduvanni ta metalurgiyi. Kharkiv: NTU «KhPI», 2016. No. 30 (1202). PP. 32–36.
  6. Avtonomova L.V., Grozenok Ie. D., Stepuk A. V. Issledovanie raspredeleniya voloknistoy strukturyi pokovki podshipnikovogo koltsa pri goryachey shtampovke [Distribution of the fibrous structure in bearing rings during hot stamping]. Visnik NTU «KhPI». Seriya: Tehnologiyi v mashinobuduvanni. Kharkiv, NTU «KhPI», 2016. No. 33 (1205). PP. 69–73.
  7. Avtonomova L.V., Grozenok E. D., Simson E. A. Modelirovanie protsessa goryachey raskatki kolec podshipnika [Modeling the process of the bearing rings hot rolling]. Visnik NTU «HPI». Seriya: Dinamika i mitsnist mashin. Kharkov, NTU «HPI», 2015, no 4 (1113), pp. 158–161.
  8. Avtonomova L.V. Imitation modeling of the process of cold rolling of bearing rings taking into account the temperature factor / L. V. Avtonomova, E. D. Grozenok // East European Journal of Advanced Technologies. – 2014. – No 4 (7). – p. 4–89.
  9. Belokurov O.A. Development of methods for designing the process of forging ring forgings with directional fiber structure: dis. ... Cand. tech. sciences. Moscow: MSTU. N.E. Bauman, 2004. 204 p.
  10. Eruç E., Shivpuri R. A summary of ring rolling technology–II. Recent trends in process modeling, simulation, planning, and control // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 1992. Vol. 32. No 3. – P. 399–413.
  11. Tomilo V. A. Modern technologies for manufacturing large-sized ring blanks / V. A. Tomilo, V. V. Levkovich // State Scientific Institution “Physical-Technical Institute” of the National Academy of Sciences of Belarus-2012. – No 3 (66). – P.110–114.
  12. Wanga Z. W. Complete modeling and parameter optimization for virtual ring rolling / Z. W. Wang, J. P. Fan, D. P. Hu, C. Y. Tang, C. P. Tsui // International Journal of Mechanical Sciences. – 2010. – Vol. 52, iss. 10. – P. 1325–1333.

*Надійшла (received) 31.10.2018*

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

**Подколзин Михаил Владимирович (Подколзін Михайло Володимирович, Podkolzin Mykhaylo Volodymyrovich)** – інженер-технолог, Лозівський ковальсько-механічний завод; м. Лозова, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7571-6973>; e-mail: [mixeiuis84@gmail.com](mailto:mixeiuis84@gmail.com)

**Кузьменко Виктор Иванович (Кузьменко Віктор Іванович, Kuzmenko Viktor Ivanovich)** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри обробки металів тиском; м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0682-4767>; e-mail: [vileta067@gmail.com](mailto:vileta067@gmail.com)

**Левченко Владимир Николаевич (Левченко Володимир Миколайович, Levchenko Volodymyr Mykolaevich)** – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, докторант, Донбаська державна металургійна академія; м. Краматорськ, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2411-4198>; e-mail: [goldangel271@gmail.com](mailto:goldangel271@gmail.com)

**Кузьменко Елена Алексеевна (Кузьменко Олена Олексіївна, Kuzmenko Olena Oleksiivna)** – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри охорони праці та навколишнього середовища; м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0633-0102>; e-mail: [vileta2017@ukr.net](mailto:vileta2017@ukr.net)

**Биба Николай Викторович (Біба Микола Вікторович, Biba Mykola Viktorovich)** – кандидат технічних наук, директор MICAS Simulations Ltd; м. Оксфорд, Велика Британія; e-mail: [nick@qform.com](mailto:nick@qform.com)

**ПОЛЯНСКИЙ В. И.**

### **ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ ФРЕЗЕРОВАНИИ И ШЛИФОВАНИИ**

Аналитически установлено, что высокоскоростное фрезерование располагает значительными технологическими возможностями с точки зрения уменьшения шероховатости поверхности при одновременном увеличении производительности обработки. Установлено также, что при шлифовании уменьшение шероховатости поверхности связано с уменьшением производительности. Наиболее прогрессивным методом шлифования, обеспечивающим одновременно увеличение производительности и уменьшение шероховатости поверхности, является глубинное шлифование с небольшой скоростью детали, которое характеризуется меньшей производительностью по сравнению с высокоскоростным фрезерованием.

**Ключевые слова:** высокоскоростное фрезерование, цилиндрическая фреза, шлифование, шлифовальный круг, шероховатость поверхности, производительность обработки, окончательная обработка, технологическая операция.

**В. І. ПОЛЯНСЬКИЙ**

### **ТЕОРЕТИЧНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ШОРСТКОСТІ ПОВЕРХНІ ПРИ ВИСОКОШВИДКІСНОМУ ФРЕЗЕРУВАННІ ТА ШЛІФУВАННІ**

Аналітично встановлено, що високошвидкісне фрезерування має у своєму розпорядженні значні технологічні можливості з погляду зменшення шорсткості поверхні при одночасному збільшенні продуктивності обробки. Встановлено також, що при шліфуванні зменшення шорсткості поверхні пов'язано зі зменшенням продуктивності. Найбільш прогресивним методом шліфування, що забезпечує одночасно збільшення продуктивності і зменшення шорсткості поверхні, є глибинне шліфування з невеликою швидкістю деталі, яке характеризується меншою продуктивністю порівняно з високошвидкісним фрезеруванням.

**Ключові слова:** високошвидкісне фрезерування, циліндрична фреза, шліфування, шліфувальний круг, шорсткість поверхні, продуктивність обробки, кінцева обробка, технологічна операція.

**V. I. POLYANSKIY**

### **THEORETICAL DETERMINATION OF SURFACE ROUGHNESS DURING HIGH-SPEED MILLING AND GRINDING**

The paper presents the results of theoretical studies of the surface roughness during milling and grinding. It is shown that high-speed milling has significant technological capabilities in terms of reducing surface roughness, because cutting data parameters are included in the calculated dependencies obtained to determine surface roughness with higher degrees than during grinding. This applies in particular to the speed of rotation of the cutter. Therefore, with its increase, it becomes possible to significantly reduce the surface roughness while increasing the processing capacity, which opens up broad prospects for the practical use of high-speed milling. It is established that during grinding, a decrease in surface roughness is associated with a decrease in productivity, and this reduces the efficiency of processing. The most progressive method of grinding, providing both an increase in productivity and a reduction in surface roughness, is deep-grinding at a low speed of the part. However, it is characterized by lower productivity in comparison with high-speed milling.

**Keywords:** high-speed milling, cylindrical mill, grinding, grinding wheel, surface roughness, processing performance, final processing, technological operation.

**Введение.** Применение современных технологий механической обработки твердосплавными и керамическими инструментами с износостойкими покрытиями открывает широкие перспективы повышения производительности и качества обработки изделий, изготовленных из различных по физико-механическим свойствам материалов. Это позволяет во многих случаях совместить предварительную и окончательную обработку в одну операцию, исключая традиционные методы финишной абразивной обработки, характеризующиеся относительно низкой производительностью. В особой мере это относится к высокоскоростному фрезерованию, осуществляемому на современных высокооборотных металлорежущих станках с ЧПУ типа «обрабатывающий центр». Как показывает практика, наряду с обеспечением высокой производительности, при высокоскоростном фрезеровании снижается количество тепла, уходящего в поверхностный слой обрабатываемой детали, что приводит к уменьшению температуры резания и повышению качества обработки. Также достигаются высокие показатели шероховатости поверхности, соизмеримые с показателями шероховатости

поверхности при шлифовании. В связи с этим, актуальна задача теоретического определения и сравнения шероховатости поверхности при высокоскоростном фрезеровании и шлифовании.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Процессам фрезерования и шлифования в научно-технической литературе постоянно уделяется большое внимание [1–4] вследствие их широкого практического использования. В последние годы получило применение высокоскоростное фрезерование [5; 6], характеризующееся высокими показателями производительности и качества обработки. Вместе с тем, в научно-технической литературе приведено недостаточно информации об условиях эффективного осуществления этого метода обработки, отсутствуют сравнительные данные методов высокоскоростного фрезерования и шлифования по критериям производительности обработки и шероховатости обработанной поверхности. Поэтому проведение теоретического определения и сравнения шероховатости поверхности при высокоскоростном фрезеровании и шлифовании позволит раскрыть истинные технологические



возможности высокоскоростного фрезерования и разработать практические рекомендации по их эффективному осуществлению.

**Цель работы** – теоретическое определение условий уменьшения шероховатости поверхности при высокоскоростном фрезеровании и шлифовании и разработка практических рекомендаций.

**Изложение основного материала.** При фрезеровании цилиндрической фрезой параметр шероховатости поверхности  $R_z$  определяется в соответствии с расчетной схемой, приведенной на рис. 1, на основе полученной в работе [1] аналитической зависимости:

$$R_z = \frac{S_z^2}{4 \cdot D}, \quad (1)$$

где  $S_z$  – подача на зуб, м/зуб;

$D$  – диаметр фрезы, м.

Параметр  $S_z$  можно выразить через скорость перемещения детали  $V_{дет}$  и скорость вращения фрезы  $V_{фр}$  с учетом кинематического соотношения

$S_z = \tau \cdot V_{дет}$ , где  $\tau = \frac{\pi \cdot D}{z \cdot V_{фр}}$  – время перемещения

фрезы на расстояние  $S_z$ , с;  $z$  – количество зубьев фрезы. Тогда

$$R_z = \frac{D}{4} \cdot \left( \frac{\pi \cdot V_{дет}}{z \cdot V_{фр}} \right)^2 = \frac{1}{4 \cdot D} \cdot \left( \frac{V_{дет}}{z \cdot n} \right)^2, \quad (2)$$

где  $V_{фр} = \pi \cdot D \cdot n$ ;

$n$  – частота вращения фрезы, об./с.

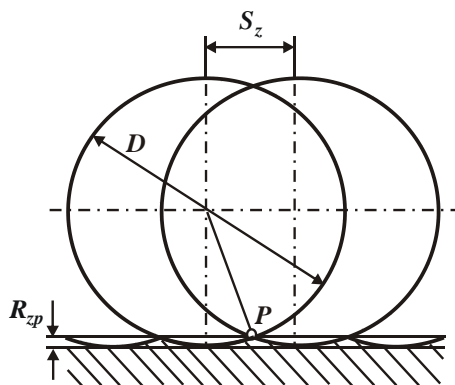


Рис. 1 – Расчетный микропрофиль обработанной поверхности при фрезеровании цилиндрической фрезой [1]

Из зависимости (2) следует, что уменьшить параметр шероховатости поверхности  $R_z$  можно уменьшением скорости перемещения детали  $V_{дет}$  и увеличением параметров  $z$ ,  $n$  и  $D$ , причем, за счет изменения параметров  $V_{дет}$ ,  $z$ ,  $n$  – в значительно большей степени, чем за счет увеличения диаметра фрезы  $D$ . Очевидно, наиболее целесообразным условием уменьшения параметра  $R_z$  необходимо

рассматривать увеличение частоты вращения фрезы  $n$ , т.е. условие перехода в область высокоскоростного фрезерования, применяя для этого современные высокооборотные металлорежущие станки с ЧПУ типа «обрабатывающий центр». Создание фрез с большим количеством режущих зубьев, что имеет место на практике, также является важным условием уменьшения параметра  $R_z$ .

Уменьшение скорости перемещения детали  $V_{дет}$  с целью уменьшения параметра шероховатости поверхности  $R_z$ , очевидно, неэффективно, поскольку требует снижения производительности обработки. Поэтому за счет существенного увеличения частоты вращения фрезы  $n$  можно добиться существенного уменьшения параметра шероховатости поверхности  $R_z$  независимо от диаметра фрезы  $D$ , который входит в зависимость (2) с меньшей степенью, чем частота вращения фрезы  $n$  (табл. 1).

Таблица 1 – Расчетные значения параметра шероховатости поверхности  $R_z$  (в мкм) при высокоскоростном фрезеровании ( $D=10$  мм;  $Z=4$ )

$n \cdot 10^3$ , об./мин	$V_{дет}$ , м/мин				
	1	4	8	12	16
1	1,56	25	100	224,6	400
10	0,0156	0,25	1,0	2,246	4,0
20	0,004	0,063	0,25	0,56	1,0
30	0,0017	0,028	0,111	0,249	0,44

Производительность обработки  $Q = \mathcal{G} / \tau$ , исходя из условия перемещения фрезы на расстояние  $S_z$  за время  $\tau = \frac{\pi \cdot D}{z \cdot V_{фр}}$ , определяется

зависимостями:

$$Q = \frac{B \cdot t \cdot S_z \cdot V_{фр} \cdot z}{\pi \cdot D} = B \cdot t \cdot S_z \cdot n \cdot z = B \cdot t \cdot S \cdot n, \quad (3)$$

где  $\mathcal{G} = B \cdot t \cdot S_z$  – объем материала, удаляемого одним зубом фрезы, м<sup>3</sup>;

$B$  – ширина фрезерования, м;

$t$  – глубина резания, м;

$S = S_z \cdot z$  – подача на один оборот фрезы, м/об.

Как видно, увеличить производительность обработки  $Q$  можно увеличением параметров  $B$ ,  $t$ ,  $S_z$ ,  $n$  и  $z$  или параметров  $B$ ,  $t$ ,  $S$  и  $n$ .

Подача на зуб  $S_z$ , обеспечивающая заданную шероховатость обработанной поверхности  $R_z$ , исходя из зависимости (1), равна:

$$S_z = \sqrt{4 \cdot D \cdot R_z}, \quad (4)$$

т.е. чем больше параметры  $D$  и  $R_z$ , тем больше  $S_z$ .

Выражая в зависимости (3) подачу на зуб  $S_z$  зависимостью (4), имеем:

$$Q = \frac{B \cdot t \cdot V_{\text{фр}} \cdot z}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{4 \cdot R_z}{D}} = B \cdot t \cdot n \cdot z \cdot \sqrt{4 \cdot D \cdot R_z} \cdot (5)$$

Увеличить производительность обработки  $Q$  с учетом ограничения по шероховатости обработанной поверхности  $R_z$  можно увеличением параметров  $B$ ,  $t$ ,  $V_{\text{фр}}$ ,  $z$  и уменьшением диаметра фрезы  $D$  или с учетом соотношения  $V_{\text{фр}} = \pi \cdot D \cdot n$  – увеличением всех входящих в зависимость (5) параметров  $B$ ,  $t$ ,  $V_{\text{фр}}$ ,  $z$  и  $D$ . Поскольку параметры  $B$  и  $t$  не влияют на  $R_z$ , согласно зависимости (1), то добиться наиболее существенного увеличения производительности обработки  $Q$  можно, прежде всего, за счет увеличения этих двух параметров.

Одним из ограничений достижения высоких показателей производительности и качества обработки при высокоскоростном фрезеровании является ограничение по предельной (прочностной) толщине среза  $a$ , которая определяется зависимостью [7]:

$$a = \frac{2 \cdot \pi}{z} \cdot \frac{V_{\text{дем}}}{V_{\text{фр}}} \cdot \sqrt{t \cdot D} \cdot (6)$$

С учетом выражения для определения производительности обработки  $Q = B \cdot V_{\text{дем}} \cdot t$  зависимость (6) принимает вид:

$$a = \frac{2 \cdot \pi}{z} \cdot \frac{Q}{B \cdot V_{\text{фр}}} \cdot \sqrt{\frac{D}{t}} \cdot (7)$$

Откуда

$$Q = \frac{a \cdot z \cdot B \cdot V_{\text{фр}}}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{t}{D}}; \quad (8)$$

$$V_{\text{дем}} = \frac{a \cdot z \cdot V_{\text{фр}}}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{t \cdot D}} \cdot (9)$$

Как видно, повысить производительность обработки  $Q$  для заданного предельного значения  $a$  можно путем увеличения ширины фрезерования  $B$ , глубины резания  $t$ , скорости вращения фрезы  $V_{\text{фр}}$  и количества режущих зубьев  $z$ .

Судя по известным экспериментальным данным [5], наиболее эффективным условием повышения производительности обработки при высокоскоростном фрезеровании считается уменьшение глубины резания  $t$  (т.е. уменьшение толщины снимаемого слоя материала) и увеличение подачи (т.е. увеличение скорости перемещения детали  $V_{\text{дем}}$ ). С физической точки зрения это связано с уменьшением температуры резания за счет снижения количества тепла, уходящего в поверхностный слой обрабатываемой детали, и увеличения количества тепла, уходящего в образующиеся стружки. Это, в частности, вытекает из аналитической зависимости для определения глубины проникновения тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали [7]:

$$l_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda \cdot \tau}{c \cdot \rho}}, \quad (10)$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности обрабатываемого материала, Вт/(м·град);

$c$  – удельная теплоемкость обрабатываемого материала, Дж/(кг·град);

$\rho$  – плотность обрабатываемого материала, кг/м<sup>3</sup>;

$\tau = h/V_{\text{дем}}$  – время контакта зуба фрезы с обрабатываемой деталью, с;

$h$  – длина контакта зуба фрезы с обрабатываемой деталью, м.

Как видно, параметр  $l_2$  вполне однозначно определяется временем  $\tau$ . Чем оно меньше, тем меньше параметр  $l_2$  и, соответственно, интенсивность теплового воздействия на поверхностный слой обрабатываемой детали, температура резания и вероятность образования на обрабатываемой поверхности температурных дефектов (прижогов, микротрещин и др.). Очевидно, увеличение скорости перемещения детали  $V_{\text{дем}}$  способствует такому протеканию теплового процесса при высокоскоростном фрезеровании, что и предопределяет основную концепцию его эффективного применения на практике. Исходя из этого, зависимости (6) – (9) следует рассматривать как дополнительные к основной концепции высокоскоростного фрезерования, связанной с уменьшением тепловой напряженности процесса резания.

Расчетную схему, приведенную на рис. 1, можно применить и для расчета шероховатости обработанной поверхности при шлифовании, рассматривая вместо положений цилиндрической фрезы на рис. 1 положения режущих зерен, представленных в форме сферы, а вместо величины подачи на зуб  $S_z$  – среднее расстояние между зернами. В этом случае параметр шероховатости поверхности  $R_z$  при шлифовании будет определяться зависимостью (1) с учетом  $S_z = B/N$ , где  $B$  – ширина шлифования, м;  $N$  – количество режущих зерен шлифовального круга, участвующих в формировании шероховатости поверхности;  $D_3$  – диаметр режущего зерна, м. Тогда

$$R_z = \frac{1}{4 \cdot D_3} \cdot \left(\frac{B}{N}\right)^2 \cdot (11)$$

Для определения количества режущих зерен шлифовального круга  $N$ , участвующих в формировании шероховатости поверхности, следует воспользоваться зависимостью:

$$N = \frac{R_z}{b} \cdot k \cdot S, \quad (12)$$

где  $b$  – максимальная высота выступания вершины режущего зерна над уровнем связки круга, м;

$k$  – поверхностная концентрация режущих зерен круга, шт./мм<sup>2</sup>;

$S = B \cdot l$  и  $l$  – соответственно площадь и длина рабочей поверхности шлифовального круга, участвующая в формировании шероховатости поверхности.

Применительно к алмазному шлифованию параметры  $k$  и  $b$  определяются зависимостями [4]:

$$k = \frac{3 \cdot m \cdot (1 - \varepsilon)}{200 \cdot \pi \cdot D_3^2}; \quad (13)$$

$$b = (1 - \varepsilon) \cdot D_3, \quad (14)$$

где  $m$  – объемная концентрация зерен алмазного круга (для 100 %-й концентрации –  $m = 100$  и т.д.);

$(1 - \varepsilon)$  – относительная величина, учитывающая степень выступания зерен алмазного круга над уровнем связки.

При плоском шлифовании  $l = \tau \cdot V_{кр}$ , где  $\tau$  – время формирования шероховатости поверхности в фиксированном поперечном сечении обрабатываемой детали, с;  $V_{кр}$  – скорость круга, м/с.

С другой стороны, время  $\tau = L / V_{дем}$ , где  $L = \sqrt{D_{кр} \cdot R_z}$  [3] – длина перемещения алмазного круга за время  $\tau$ , м;  $D_{кр}$  – диаметр круга, м;  $V_{дем}$  – скорость перемещения детали, м/с. Тогда

$$l = \sqrt{D_{кр} \cdot R_z} \cdot \frac{V_{кр}}{V_{дем}}. \quad (15)$$

После подстановки всех полученных выражений в зависимость (15) имеем:

$$R_z = \frac{1}{4 \cdot D_3} \cdot \left( \frac{200 \cdot \pi \cdot D_3^3 \cdot V_{дем}}{3 \cdot m \cdot R_z \cdot \sqrt{D_{кр} \cdot R_z} \cdot V_{кр}} \right)^2. \quad (16)$$

Разрешая зависимость (16) относительно параметра шероховатости поверхности  $R_z$ , получено:

$$R_z = D_3 \cdot \sqrt{\frac{100 \cdot \pi \cdot V_{дем}}{3 \cdot m \cdot V_{кр}}} \cdot \sqrt{\frac{D_3}{D_{кр}}}. \quad (17)$$

Как видно, уменьшить параметр шероховатости поверхности  $R_z$  при плоском шлифовании можно главным образом за счет уменьшения зернистости круга  $D_3$ , поскольку этот параметр входит в зависимость (17) с наибольшей степенью. Уменьшению параметра  $R_z$  также способствует уменьшение  $V_{дем}$  и увеличение параметров  $m$ ,  $V_{кр}$  и  $D_{кр}$  (табл. 2).

Таблица 2 – Расчетные значения параметра шероховатости поверхности  $R_z$  (в мкм) при шлифовании ( $m = 100$ ;  $D_3 = 100$  мкм;  $D_{кр} = 300$  мм)

$V_{кр}$ , м/с	$V_{дем}$ , м/мин				
	1	4	8	12	16
20	0,39	0,78	1,1	1,35	1,56
40	0,275	0,55	0,778	0,954	1,1
100	0,174	0,349	0,492	0,6	0,698
150	0,086	0,285	0,4	0,493	0,57

Сравнение расчетных данных, приведенных в табл. 1 и табл. 2, показывает, что с увеличением частоты вращения фрезы  $n$  при высокоскоростном фрезеровании параметр  $R_z$  существенно уменьшается. Достигнуть таких небольших значений параметра  $R_z$  при шлифовании, согласно зависимости (17), можно лишь за счет существенного уменьшения зернистости круга  $D_3$ , что свидетельствует о значительных возможностях высокоскоростного фрезерования.

В отличие от зависимости (2), зависимость (17) содержит параметры со значительно меньшими степенями. Следовательно, при фрезеровании цилиндрической фрезой можно в более широких пределах изменять параметр шероховатости поверхности  $R_z$  по сравнению с процессом шлифования. Это связано, прежде всего, с возможностью реализации высокоскоростного фрезерования [7], характеризующегося повышенными значениями скорости вращения фрезы  $V_{фр}$  и соответственно частоты вращения фрезы  $n$  в зависимости (2). В этом случае параметр  $R_z$  может принимать значения, которые имеют место при финишной обработке шлифованием. Учитывая, что высокоскоростное фрезерование является высокопроизводительным методом обработки, можно предварительную и окончательную обработку совместить в одну технологическую операцию, обеспечивая дополнительное повышение производительности.

Основной эффект уменьшения параметра  $R_z$  при шлифовании, исходя из зависимости (17), обусловлен уменьшением зернистости круга  $D_3$ , а также увеличением скорости круга  $V_{кр}$ , поскольку уменьшение скорости перемещения детали  $V_{дем}$  приводит к уменьшению производительности обработки.

Для определения производительности обработки при шлифовании с учетом ограничения по шероховатости обработанной поверхности зависимость (17) следует разрешить относительно скорости перемещения детали  $V_{дем}$ :

$$V_{дем} = \frac{3 \cdot m \cdot V_{кр}}{100 \cdot \pi} \cdot \left( \frac{R_z}{D_3} \right)^2 \cdot \sqrt{\frac{D_{кр}}{D_3}}. \quad (18)$$

Тогда

$$Q = B \cdot V_{дем} \cdot t = \frac{3 \cdot m \cdot B \cdot t \cdot V_{кр}}{100 \cdot \pi} \cdot \left( \frac{R_z}{D_3} \right)^2 \cdot \sqrt{\frac{D_{кр}}{D_3}}. \quad (19)$$

Аналогично зависимости (5), полученной применительно к процессу фрезерования цилиндрической фрезой, зависимость (19) также содержит параметры  $B$  и  $t$ , которые не входят в зависимость (17) для определения параметра шероховатости поверхности  $R_z$ . Поэтому добиться наиболее существенного повышения производительности обработки  $Q$  с учетом ограничения по шероховатости обработанной поверхности  $R_z$  можно также за счет увеличения этих двух параметров. Однако, как известно, увеличение глубины шлифования  $t$  приводит к увеличению максимальной толщины среза зерном круга, что требует уменьшения скорости перемещения детали  $V_{дет}$ , т.е. применения схемы глубинного шлифования. Следовательно, добиться одновременно увеличения производительности обработки  $Q$  и уменьшения параметра шероховатости поверхности  $R_z$  можно в условиях глубинного шлифования с небольшой скоростью перемещения детали  $V_{дет}$ . Сделанный вывод подтверждается экспериментальными данными, полученными как при абразивном, так и алмазном шлифовании [3]. Это позволяет рассматривать метод глубинного шлифования в качестве одного из наиболее перспективных методов предварительного и окончательного шлифования, а в ряде случаев, позволяющего эффективно совместить предварительное и окончательное шлифование в одну операцию и существенно повысить производительность при обеспечении высокого качества обработки.

**Выводы.** В работе приведены результаты теоретических исследований шероховатости поверхности при обработке фрезерованием и шлифованием. Показано, что высокоскоростное фрезерование располагает значительными технологическими возможностями с точки зрения уменьшения шероховатости поверхности, т.к. параметры режима резания входят в полученные расчетные зависимости для определения шероховатости поверхности с более высокими степенями, чем при шлифовании. В особенности это относится к скорости вращения фрезы. Поэтому с ее увеличением появляется возможность существенного уменьшения шероховатости поверхности при одновременном увеличении производительности обработки, что открывает широкие перспективы практического использования высокоскоростного фрезерования. Установлено, что при шлифовании уменьшение шероховатости поверхности связано с

уменьшением производительности, а это снижает эффективность обработки. Наиболее прогрессивным методом шлифования, обеспечивающим одновременно увеличение производительности и уменьшение шероховатости поверхности, является глубинное шлифование с небольшой скоростью детали. Однако оно характеризуется меньшей производительностью по сравнению с высокоскоростным фрезерованием.

#### Список литературы

1. Бобров В. Ф. Основы теории резания металлов / В. Ф. Бобров. – М.: Машиностроение, 1975. – 343 с.
2. Лоладзе Т. Н. Прочность и износостойкость режущего инструмента / Т. Н. Лоладзе. – М.: Машиностроение, 1982. – 320 с.
3. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / под общ. ред. Ф. В. Новикова и А. В. Якимова. В десяти томах. – Одесса: ОНПУ, 2002. – Т. 1. "Механика резания материалов". – 580 с.
4. Алмазно-абразивная обработка материалов: справочник / под ред. проф. А. Н. Резникова. – М.: Машиностроение, 1977. – 390 с.
5. Баталин А. С. Тенденции развития высокоскоростной обработки / А. С. Баталин, В. М. Мануйленко // Физические и компьютерные технологии: труды 15-й Международной научно-технической конференции, 2–3 декабря 2009, г. Харьков. – Х.: ХНПК "ФЭД", 2009. – С. 137–145.
6. Рябенков І. О. Підвищення ефективності фінішної обробки деталей гідроапаратури на основі вибору раціональної структури і параметрів операцій: автореф. дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.02.08 "Технологія машинобудування" / І. О. Рябенков. – Одеса, 2009. – 21 с.
7. Технологии производства: проблемы и решения : монография / Ф.В. Новиков, В.А. Жовтобрюх, С.А. Дитиненко, А.Г. Крюк, Н. Ф. Савченко, В.Г. Шкурупий, В.И. Полянский, И.А. Рябенков, Д.Ф. Новиков. – Д.: ЛИРА, 2018. – 536 с.

#### References (transliterated)

1. Bobrov V. F. Osnovy teorii rezaniya metallov / V. F. Bobrov. – Moscow: Mashinostroyeniye, 1975. – 343 p.
2. Loladze T. N. Prochnost' i iznosostoykost' rezhushchego instrumenta / T. N. Loladze. – Moscow: Mashinostroyeniye, 1982. – 320 p.
3. Fiziko-matematicheskaya teoriya protsessov obrabotki materialov i tekhnologii mashinostroyeniya / pod obshch. red. F. V. Novikova i A. V. Yakimova. V desyati tomakh. – Odessa: ONPU, 2002. – Vol. 1. "Mekhanika rezaniya materialov". – 580 p.
4. Almazno-abrazivnaya obrabotka materialov: spravochnik / pod red. prof. A. N. Reznikova. – Moscow: Mashinostroyeniye, 1977. – 390 p.
5. Batalin A. S. Tendentsii razvitiya vysokoskorostnoy obrabotki / A. S. Batalin, V. M. Manuylenko // Fizicheskiye i komp'yuternyye tekhnologii: trudy 15-y Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, 2–3 dekabrya 2009, g. Khar'kov.– KH.: KHNPК "FED", 2009. – P. 137–145.
6. Ryabenkov I. O. Pidvyshchennya efektyvnosti finishnoy obrobky detaley gidroaparatury na osnovi vyboru ratsional'noyi struktury i parametriv operatsiy: avtoref. dys. ... kand. tekhn. nauk : spets. 05.02.08 "Tekhnolohiya mashynobuduvannya" / I. O. Ryabenkov. – Odesa, 2009. – 21 p.
7. Tekhnologii proizvodstva: problemy i resheniya: monografiya / F.V. Novikov, V.A. Zhovtobryukh, S.A. Ditenenko, A.G. Kryuk, N. F. Savchenko, V.G. Shkurupiy, V.I. Polyanskiy, I.A. Ryabenkov, D.F. Novikov. – D.: LIRA, 2018. – 536 p.

Поступила (received) 03.09.2018

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

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

**А.М. ПОТЯТИНИК, В.М. ГОРНОСТАЙ, С.Ф. САБОЛ, О.С.ГОЛОВКО, М.О. ЄФРЕМОВ,  
А.О.БРЕНЗЕЙ**

### **ВИЗНАЧЕННЯ ВПЛИВУ ПОЧАТКОВОГО ПОЛОЖЕННЯ ЗАГОТОВКИ НА ПАРАМЕТРИ ПРОЦЕСА ХОЛОДНОГО ЗВОРОТНОГО ВИДАВЛЮВАННЯ ПОРОЖНИСТИХ ВИРОБІВ З РОЗДАЧОЮ**

Досліджено вплив розташування заготовки в матриці на процес отримання порожнистих виробів зворотним видавлюванням з роздачою. Визначено геометрію кінцевого виробу, напружено-деформований стан та силові параметри процесу холодного видавлювання порожнистих виробів з роздачою. Сформульовано подальші етапи досліджень за допомогою чисельних експериментів для визначення впливу наступних параметрів (ступінь деформування, кут конуса матриці, коефіцієнт роздачі, швидкість деформування та швидкість переміщення матриці) процесу зворотного видавлювання з роздачою для розробки раціональних технологічних процесів отримання виробів.

**Ключові слова:** порожнистий виріб, холодне зворотне видавлювання з роздачою, метод скінченних елементів, зусилля видавлювання, питомі зусилля, напруження, деформації, форма і розміри виробів.

**А.Н. ПОТЯТЫНИК, В.Н. ГОРНОСТАЙ, С.Ф. САБОЛ, О.С. ГОЛОВКО, М.О. ЕФРЕМОВ, А.О. БРЕНЗЕЙ**

### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛИЯНИЯ НАЧАЛЬНОГО ПОЛОЖЕНИЯ ЗАГОТОВКИ НА ПАРАМЕТРЫ ПРОЦЕССА ХОЛОДНОГО ОБРАТНОГО ВЫДАВЛИВАНИЯ ПОЛЫХ ИЗДЕЛИЙ С РАЗДАЧЕЙ**

Исследовано влияние начального положения заготовки относительно матрицы на процесс обратного выдавливания с раздачей. Определены форма полученного изделия, напряженно-деформированное состояние заготовки и силовые параметры процесса формообразования изделия с необходимыми размерами и качеством конечного изделия в зависимости от начального положения заготовки. Сформулированы дальнейшие этапы исследований с помощью численных экспериментов для определения влияния параметров (степень деформации, угол конуса матрицы, коэффициент раздачи, скорость деформирования и скорость перемещения матрицы) процесса обратного выдавливания для разработки рациональных технологических процессов получения изделий. Определена степень использования ресурса пластичности, спрогнозирована степень упрочнения деформированного изделия. Определено необходимость использования дополнительных приспособлений для извлечения заготовки из полости штампа.

**Ключевые слова:** полый изделие, холодное обратное выдавливание с раздачей, метод конечных элементов, усилия выдавливания, удельные усилия, напряжения, деформации, форма и размеры изделий.

**А.М. ПОТЯТІНУК, В.М. ГОРНОСТАЙ, С.Ф. САБОЛ, О.С. ГОЛОВКО, М.О. ЄФРЕМОВ, А.О. БРЕНЗЕЙ**

### **DETERMINATION OF INFLUENCE OF INITIAL POSITION OF PURVEYANCE ON THE PARAMETERS OF PROCESS OF THE COLD REVERSE SQUEEZING OUT OF HOLLOW WARES WITH DISTRIBUTION**

The processes of producing products by cold forging are used in many industries, but its wide distribution is hampered by the presence of large specific stresses on the tool. This significantly reduces the durability of the working tool. Special attention should be paid to the military industrial complex, namely the manufacture of ammunition. Such production requires high-performance and low-cost technologies that allow to obtain high-precision products or semi-finished products with enhanced performance properties. Cold extrusion is widely used for high-performance manufacturing of precision hollow products from steel and non-ferrous metals. A comparative analysis of various methods has shown that the most promising is a method for producing products by cold-reverse extrusion with dispensing. The analysis of existent charts of receipt of hollow wares is conducted. Advantages and defects are certain. Influence of initial position of purveyance is investigational in relation to a matrix on the process of the reverse squeezing out with distribution. The form of the got good, tensely-deformed state of purveyance and power parameters of process of формообразования of good, is certain with necessary sizes and quality of eventual good depending on initial position of purveyance. The further stages of researches are set forth by means of numeral experiments for determination of influence of parameters (degree of deformation, cone of matrix angle, coefficient of distribution, speed of deformation and speed of moving of matrix) of process of the reverse squeezing out for development of rational technological processes of receipt of wares. The degree of the use of resource of plasticity, degree of work-hardening of the deformed good, is certain. The necessity of the use of additional adaptations is certain for extraction of purveyance from the cavity of stamp.

**Keywords:** hollow product, cold reverse extrusion with distribution, finite element method, extrusion force, specific forces, stress, deformation, shape and size of products.

Процеси отримання виробів холодним об'ємним штампуванням використовуються в багатьох галузях промисловості, але його широке розповсюдження гальмується наявністю великих питомих напружень на інструменті. Це суттєво зменшує стійкість робочого інструменту. Особливої уваги заслуговує військовий промисловий комплекс, а саме виготовлення боєприпасів [1]. Таке виробництво потребує високопродуктивних та маловитратних технологій, які дозволяють отримати високоточні вироби або напівфабрикати з підвищеними експлуатаційними властивостями [2,3]. Для високопродуктивного

виготовлення точних порожнистих виробів із сталей і кольорових металів широко використовують холодне видавлювання. Порівняльний аналіз різних способів виконано в роботі [4], як найбільш перспективний спосіб отримання виробів холодним видавлюванням є холодне зворотне видавлювання з роздачою. Переваги використання цього методу представлені в роботі [5].

**Метою даної роботи** є визначити вплив початкового розташування заготовки в матриці на процес зворотного видавлювання порожнистих виробів з роздачою.

Застосування метода скінчених елементів (МСЕ) для теоретичного аналізу процесів холодного видавлювання дозволяє визначити дані для проектування технології і штапового оснащення, які не потребують доопрацювання експериментальними роботами [6, 7]. В роботі використана скінченно-елементна програма DEFORM. Метал заготовок вважається пружно-пластичним зі зміцненням, деформуючий інструмент – абсолютно жорстким. Використання такої моделі металу дозволяє визначити кінцеві форму і розміри виробів, а також виконати моделювання процесів виймання пуансона із здеформованої заготовки та виштовхування її із матриці після видавлювання.

**Постановка задачі.** На рис. 1 показано розрахункову схему процесу (де: 1 – матриця, 2 –

пуансон, 3 – виштовхувач, 4 – заготовка). Вихідна заготовка із сталі 20 діаметром 40 мм та висотою 50 мм з наступними властивостями: умовна межа текучості  $\sigma_{0,2} = 380 \text{ МПа}$ , модуль Юнга  $2,1 \cdot 10^5 \text{ МПа}$  [3] та коефіцієнт Пуассона 0,3, яка отримується різанням в штампах з прутка. Враховано вплив тертя по Кулону з коефіцієнтом тертя  $\mu = 0,08$ . Швидкість деформування складала  $V_0 = 2 \text{ мм/сек}$ . Висота на яку вступає заготовка з матриці  $h$ . Пуансон починає рухатися зі швидкістю  $V_0$  (вихідне положення рис.1, а). Після занурення пуансона в заготовку матриця починає рухатися з такою ж швидкістю що й пуансон, що дозволяє реалізувати схему зворотного видавлювання порожнистого виробу з роздачою.

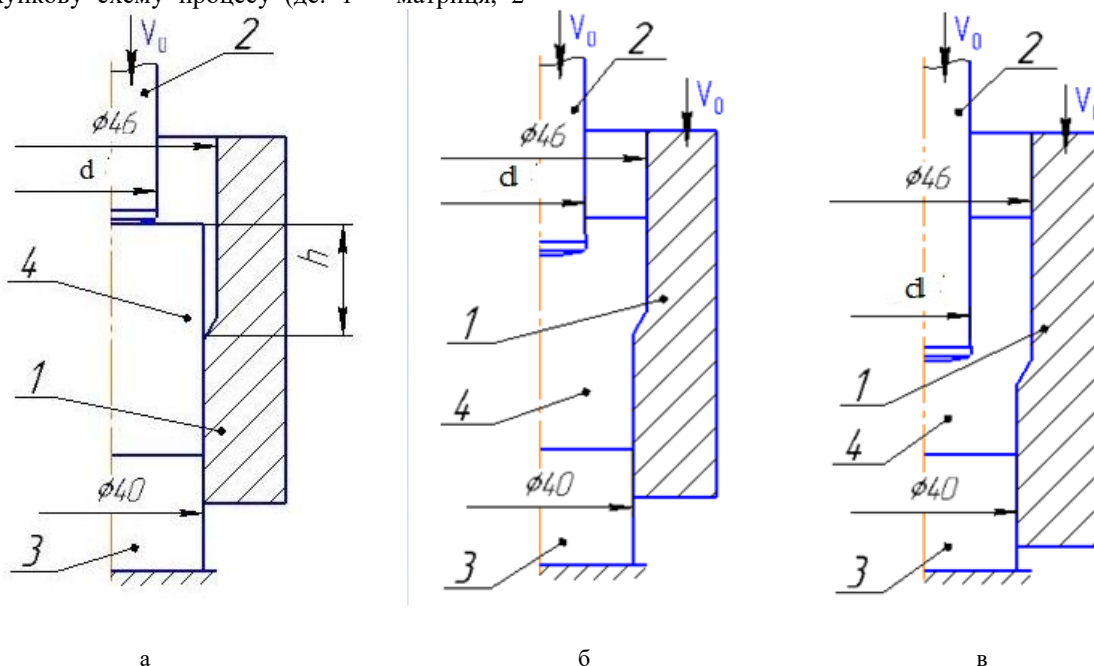


Рис. 1 – Розрахункова схема зворотного видавлювання з роздачою

Шляхом чисельного експерименту в програмному комплексі DEFORM-3D було проведено чисельний експеримент зворотного видавлювання порожнини з роздачою.

Моделювання виконували в пружно-пластичній постановці. На рис. 2, а зображена схема на початку зворотного видавлювання з роздачою. Заготовка 1 встановлена в матриці 2 на виштовхувачі 3. При переміщенні пуансона 4 виконується формоутворення виробу 5 (рис. 2, б).

Моделюванням для кожної схеми видавлювання з різним розташуванням заготовки відносно матриці встановлена послідовність видалення готових виробів із матриць після видавлювання. Наявність пристрою в штампі для знімання виробу із пуансона визначає моделювання процесу виймання пуансона з заготовки.

На рис. 2, в наведено положення виймання пуансона з виробу. Після зворотного видавлювання з роздачою, при русі пуансона 1 вгору, виріб 2 спочатку залишається в матриці до тих пір поки калібруючий поясок торця пуансона торкнеться торця виробу (рис. 2, в). При подальшому переміщенні пуансона 1 виріб 2 залишається на пуансоні і повністю виходить із матриці (рис. 2, г). Готовий виріб наведено на рис. 2, д.

**Результати досліджень.** На рис.3 показано залежність геометрії кінцевого виробу від висоти початкового розташування заготовки. Утворення стінки необхідної товщини спостерігається при висоті 12 та 15 мм. Подальше збільшення висоти не впливає на заповнення. При малих висотах спостерігається процес зворотного видавлювання з мінімальною роздачою стінки.

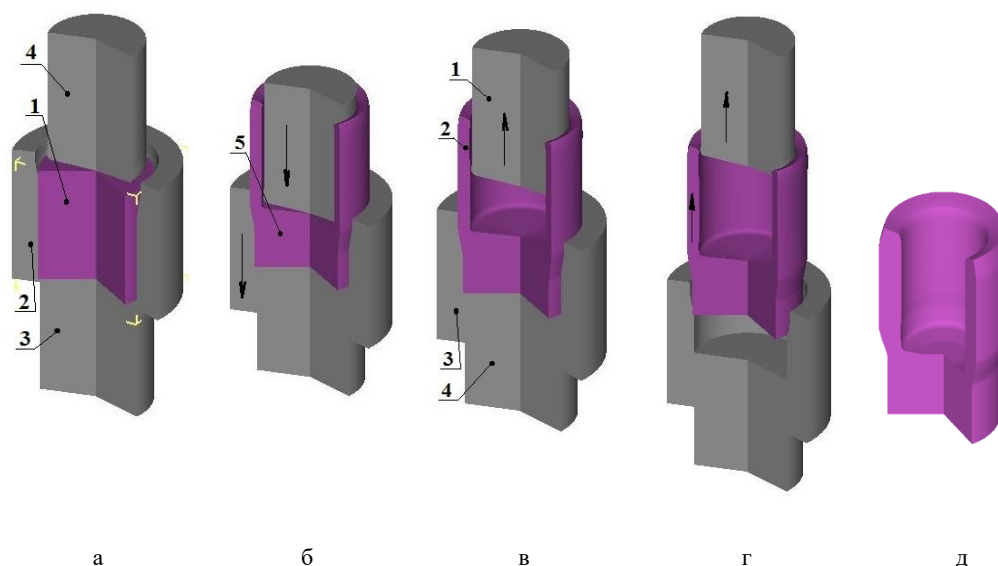
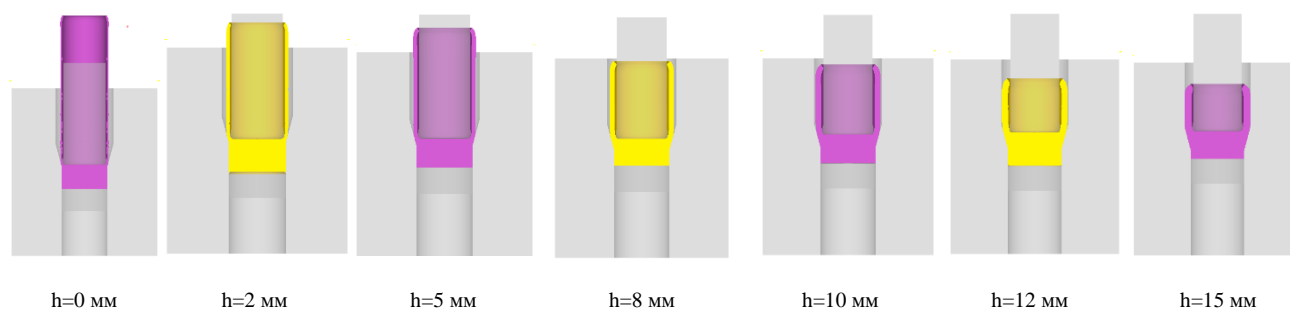


Рис. 2 – Етапи формоутворення порожнистого виробу холодним видавлюванням з роздачою

Рис. 3 – Залежність геометрії виробу від висоти початкового розташування  $h$  заготовки

На рис. 4 зображені розрахункові залежності зусилля зворотного видавлювання з роздачою (рис.4а) від переміщення деформуючого інструмента та залежність максимального зусилля видавлювання від висоти початкового розташування  $h$  заготовки (рис.3б). Зусилля спочатку зростає до моменту виходу металу в зазор між матрицею і калібруючим пояском пуансона, а в подальшому залишаються постійними. Найбільшого значення зусилля (4300 кН) досягає при мінімальній висоті  $h = 0$  мм, коли заготовка встановлюється повністю в матрицю. З залежності розподілу максимальних зусиль (рис.4б) видно що збільшення висоти призводить до значного зменшення максимального зусилля видавлювання майже в 2 рази. Це пов'язано з зміною напружено деформованого стану в осередку деформації. Та зменшенню опору витікання металу в стінку заготовки. На рис. 5 представлено розподіл інтенсивності напружень в об'ємі заготовки в навантаженому стані при

максимальному зусиллі процесу зворотного видавлювання порожнини з роздачою. З якого можна оцінити зміцнення та кількісне його значення в стінці та донній частині кінцевого виробу. З наведеного розподілу видно що найбільше зміцнення досягаються при висотах від 5 до 12 мм. На рис. 6 показано ступінь використання ресурсу пластичності в об'ємі заготовки. При малих висотах до 5 мм він досягає максимальних значенні в стінці що свідчить про велику імовірність утворення дефектів в кінцевому виробі. Тому при розробці технологічного процесу слід уникати такого початкового розташування заготовки в матриці. При подальшому дослідженні процесів зворотного видавлюванні порожнини з роздачою важливо визначити такі параметри процесу (максимально можливу ступінь деформування, кут конуса матриці, коефіцієнт роздачі, швидкість деформування та швидкість переміщення матриці [4]), які б дозволили отримувати виріб за найменшою кількістю переходів з необхідними властивостями.



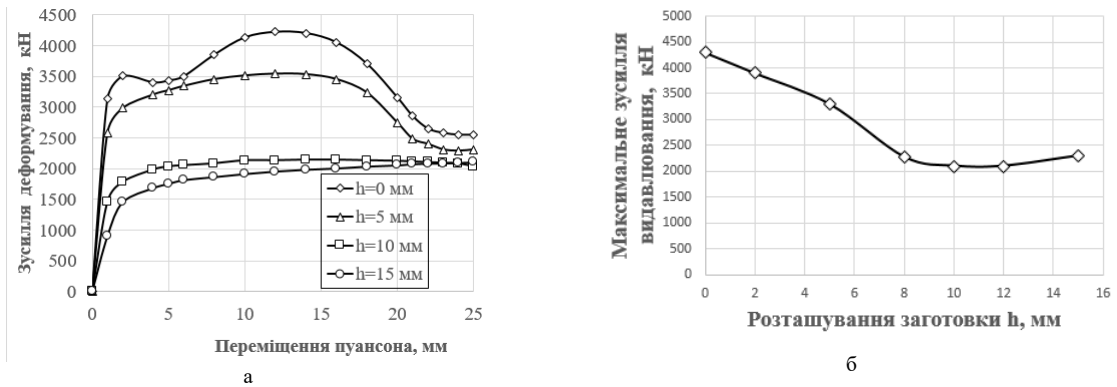


Рис. 4 – Залежність зусилля видавлювання: а – від переміщення пуансона; б – максимальних зусиль від висоти початкового розташування заготовки.

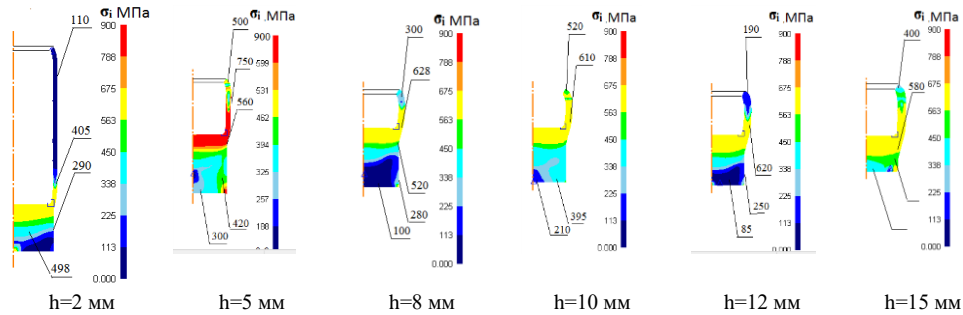


Рис. 5 – Розподіл інтенсивності напружень  $\sigma_1$  в об'ємі заготовки

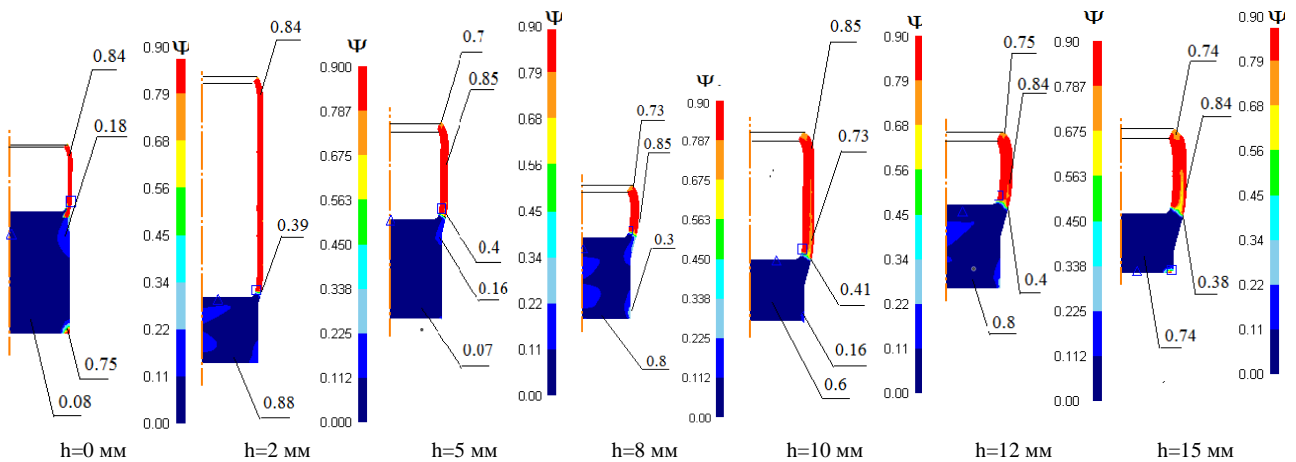


Рис.6 – Розподіл ступеня використання ресурсу пластичності в об'ємі заготовки.

Виходячи з вище наведеного при проведенні подальшого дослідження, за допомогою чисельних експериментів, розташовувати заготовку відносно матриці необхідно в межах від 5 до 12 мм та необхідно визначити наступне: 1 – співвідношення швидкостей переміщення пуансону та матриці, які дозволять отримати вироби за мінімальну кількість переходів, 2 – оптимальний кут конуса матриці який дозволить зменшити питомі напруження на робочому інструменті, 3 – максимально можливу ступінь деформації за один перехід при мінімальних питомих напруженнях на інструменті для підвищення стійкості штампового оснащення.

**Висновки.** Досліджено вплив початкового розташування заготовки на можливість отримання порожнистих виробів зворотним видавлюванням з роздачою. Визначено параметри які суттєво впливають на цей процес. Сформульовано подальші етапи досліджень за допомогою чисельних експериментів для встановлення впливу параметрів (ступінь деформування, кут конуса матриці, коефіцієнт роздачі, швидкість деформування та швидкість переміщення матриці) процесу зворотного видавлювання.

## Список літератури

1. Холодная объемная штамповка. Справочник. / под ред. Г.А. Навроцкого. – М.: Машиностроение, 1973, – 496 с.
2. Ковка и штамповка. Справочник. В 4-х т.; т. 3. Холодная объемная штамповка / Под ред. Г.А. Навроцкого. – М.: 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. – М.: Металлургия, 1973 – 224 с.
4. Калюжний В.Л. Аналіз схем холодного видавлювання віссиметричних порожнистих виробів / Калюжний В.Л., Потятиник А.М. // Наукові нотатки. Міжвузівський збірник. Луцьк 2017. Випуск №59. – С. 137–143.
5. Калюжний В.Л. Сравнительный анализ процессов обратного выдавливания и прямого выдавливания с раздачей изделий с полостью постоянного диаметра / В.Л. Калюжний, Л.И. Алиева, И.П. Куликов // Обработка материалов давлением: сб. науч. трудов. – Краматорск: ДГМА, 2013. – №4(37). – С. 87–92
6. Потятиник А.М. Аналіз впливу параметрів процесу холодного зворотнього видавлювання порожнистих виробів з роздачою / Потятиник А.М., Горностай В.М, Сабол С.Ф. // Вісник НТУ «ХПІ». 2017. № 37 (1259). – С.66–70.
7. Калюжний В.Л. Определение усилий извлечения пуансона из сформированной заготовки и выталкивания заготовки из матрицы при холодном выдавливании полых изделий с разной степенью деформации / В.Л. Калюжний, Л.И. Алиева, В.Н. Горностай // Усовершенствование процессов и оборудования для обработки давлением в металлургии и машиностроении: сб. науч. трудов. – Краматорск: ДГМА, 2016. – №1(42). – С. 90–100.
8. Deform-3D – мощная система моделирования технологических процессов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.thesis.com.ru/software/deform>.

## References (transliterated)

1. Kholodnaya ob'emnaya shtampovka. Spravochnyk. / Pod red. H.A. Navrotskoho. – Moscow. Mashynostroeniye, 1973, – 496 p.
2. Kovka y shtampovka. Spravochnyk. V 4-kh t.; vol. 3. Kholodnaya ob'emnaya shtampovka / pod red. H.A. Navrotskoho. – Moscow.: Mashynostroeniye, 1987. –384 p.
3. Tre't'yakov A.V. Mekhanycheskiye svoystva metallov y splavov pry obrabotke davlenyem / A.V. Tre't'yakov, V.Y. Zyuzyn // 2-e yzd. – Moscow: Metallurhiya, 1973 – 224 p.
4. Kalyuzhnyy V.L. Analiz skhem kholodnoho vydavlyuvannya visesymetrychnykh porozhnistykh vyrobiv / Kalyuzhnyy V.L., Potyatynik A.M. // Naukovi notatky. Mizhviziv's'kyy zbirnyk. Luts'k 2017. Vypusk No 59. P. 137–143.
5. Kalyuzhnyy V.L. Sravnytel'nyy analiz protsessov obratnoho vidavlyvannya y pryamoho vydavlyvannya s razdachey yzdeliy s polost'yu postoyannoho dyametra / V.L. Kalyuzhnyy, L.Y. Alyeva, Y.P. Kulykov // Obrabotka materialov davlenyem: sb. nauch. trudov. – Kramatorsk: DHMA, 2013. – No 4(37). – P. 87–92.
6. Potyatynik A.M. Anallz vplivu parametriv protsesu holodnoho zvorotnogo vidavlyuvannya porozhnistih virobiv z rozdachoyu / Potyatynik A.M., Hornostay V.M, Sabol S.F. // Visnik NTU «HPi». 2017. No 37 (1259). P. 66–70.
7. Kalyuzhnyy V.L. Opredelenye uslyly yzvlachenyya puansona yz sformirovannoy zahotovky y vital'kyvannya zahotovky yz matrytsy pry kholodnom vydavlyvannyi polykh yzdeliy s raznoy stepen'yu deformatsyy / V.L. Kalyuzhnyy, L.Y. Alyeva, V.N. Hornostay // Usovershenstvovanye protsessov y oborudovanyya dlya obrabotky davlenyem v metallurhiy y mashynostroeny: sb. nauch. trudov. – Kramatorsk: DHMA, 2016. – No 1(42). – P. 90–100.
8. Deform-3D – moshchnaya sistema modelyrovannya tekhnolohycheskykh protsessov [Elektronniy resurs]. – Rezhym dostupa: <http://www.thesis.com.ru/software/deform>.

Надійшла (received) 11.11.2018

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

**Потятиник Андрій Миколайович (Potyatynik Andrii Mykolaiovych)** – аспірант, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут» імені Ігоря Сікорського, тел.: (095) 3671932 Qdx@ukr.net

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

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

**Головко Оксана Сергіївна (Golovko Oksana Sergeevna)** – студентка, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут» імені Ігоря Сікорського, тел.: (099) 6074453; e-mail: golovko19951510@gmail.com

**Єфремов Михайло Олегович (Yefremov Mykhail Olegovich)** – студент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут» імені Ігоря Сікорського, тел.: (050) 8715287; e-mail: w.gornostay@kpi.ua

**Брензей Андрій Олегович (Brenzei Andriy Olegovich)** – студент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут» імені Ігоря Сікорського, тел.: (093) 6912038; e-mail: brenzei.andrei@gmail.com

**О. А. РЕМЕЗ, И. К. ОГИНСКИЙ**

### **МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА НЕПРЕРЫВНОЙ ПРОКАТКИ В КАЛИБРАХ СИСТЕМЫ «ОВАЛ-КВАДРАТ»**

Разработка технологии прокатки для различных групп сталей на непрерывных станах, выполняется в отсутствие достаточно глубоких сведений о взаимосвязи высотной и поперечной деформаций в условиях переднего, заднего натяжения и совместного их действия. Недостаточно исследованным также, является влияние систем вытяжных калибров на параметры прокатки в непрерывных станах. Исследования параметров прокатки в калибрах системы «овал-квадрат» (рассмотрены на примере схемы «квадрат-овал» при прокатке квадратной заготовки в овальном калибре) проводилось с использованием программы компьютерного моделирования процессов обработки металлов давлением FORGE 3D, разработанной компанией TRANSVALOR S.A. FORGE 3D. Исследования проводились для стали 08X13, указанная сталь относится к числу тех, которые обладают склонностью к повышенному уширению. Названная особенность сталей изучена в недостаточной степени, и по этой причине возникают трудности при разработке режимов обжатий. Результаты, представленные в статье предназначены, в частности, для использования в экспериментальных исследованиях. Моделирование по указанной схеме выполнялось для случаев прокатки с различными сочетаниями переднего и заднего натяжения. Исследования проводились для условий рассогласования скоростей переднего, заднего, одновременно переднего и заднего концов полосы. Диапазон относительного рассогласования скоростей (по отношению к прокатке без натяжения) составил 2,5...10 % с кратностью 2,5. Диапазон изменения коэффициентов вытяжки составил  $\lambda=1,12...1,72$ , он является достаточно характерным для данной системы калибров. Целью настоящей работы является развитие подходов к исследованиям кинематических параметров непрерывной сортовой прокатки на основе методов компьютерного моделирования, выявление на этой основе сведений о закономерностях изменения технологических параметров при непрерывной прокатке в системе вытяжных калибров «овал-квадрат».

**Ключевые слова:** моделирование, система калибров, реология, натяжение, коэффициент вытяжки, прокатка.

**О. А. РЕМЕЗ, І. К. ОГІНСЬКИЙ**

### **МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ БЕЗПЕРЕРВНОЇ ПРОКАТКИ В КАЛІБРАХ СИСТЕМИ «ОВАЛ-КВАДРАТ»**

Розробка технології прокатки для різних груп сталей на безперервних станах, виконується за відсутності досить глибоких відомостей про взаємозв'язок висотної та поперечної деформації в умовах переднього, заднього натягу і спільного їх дії. Недостатньо дослідженим також, є вплив систем витяжних калібрів на параметри прокатки в безперервних станах. Дослідження параметрів прокатки в калібрах системи «овал-квадрат» (розглянуті на прикладі схеми «квадрат-овал» при прокатці квадратної заготовки в овалному калібрі) проводилося з використанням програми комп'ютерного моделювання процесів обробки металів тиском FORGE 3D, розробленої компанією TRANSVALOR S.A. FORGE 3D. Дослідження проводилися для сталі 08X13, зазначена сталь відноситься до числа тих, які мають схильність до підвищеного розширення. Названа особливість сталей вивчена в недостатньому ступені, і з цієї причини виникають труднощі при розробці режимів обтиснень. Результати, представлені в статті призначені, зокрема, для використання в експериментальних дослідженнях. Моделювання по зазначеній схемі виконувалося для випадків прокатки з різними поєднаннями переднього та заднього натягу. Дослідження проводилися для умов неузгодженості швидкостей переднього, заднього, одночасно переднього і заднього кінців штаби. Діапазон відносної неузгодженості швидкостей (по відношенню до прокатки без натягу) склав 2,5 ... 10 % з кратністю 2,5. Діапазон зміни коефіцієнтів витяжки склав  $\lambda = 1,12...1,72$ , цей діапазон є досить характерним для даної системи калібрів. Метою цієї роботи є розвиток підходів до досліджень кінематичних параметрів безперервної сортової прокатки на основі методів комп'ютерного моделювання, виявлення на цій основі відомостей про закономірності зміни технологічних параметрів при безперервній прокатки в системі витяжних калібрів «овал-квадрат».

**Ключові слова:** моделювання, система калібрів, реологія, натяг, коефіцієнт витяжки, прокатка.

**O. A. REMEZ, I. K. OGINSKIJ**

### **SIMULATION OF THE PROCESS OF CONTINUOUS ROLLING IN THE PASSES OF THE SYSTEM "OVAL – SQUARE"**

The development of technologies of rolling for different groups of steels in continuous mills is carried out in the absence of sufficiently profound knowledge about intercommunication between deformation through the height and transverse deformation in conditions of the front and backward pull (tension) and their joint action. The influence of the system of breakdown passes on parameters of rolling in continuous mills remains also insufficiently investigated. Investigations of parameters of rolling in passes of the system "oval – square" are introduced in the present work.. They are considered on the example of the scheme "square – oval" while rolling the square billet in the oval pass. Investigations were carried out using the program for computerized simulation of processes of metal forming FORGE 3D developed by the company TRANSVALOR S.A. FORGE 3D. They were carried out for the steel 08X13 of the number of steels disposed to heightened spreading. The mentioned characteristic property of steels is insufficiently studied, and because of this are difficulties while developing drafting schedules. Results presented in this paper are intended, in particular, to be used in experimental studies.

Simulation according to presented scheme was carried out for cases of rolling with differed combinations of the front and backward tension. Investigations were made for conditions of mismatch of the front, back and simultaneously of the front and back ends of the strip. The range of relative mismatch of speeds (with respect to rolling without tension) was 2.5 ... 10%, with number divisible by 2.5.

The range of the change for the values of reduction ratio was  $\lambda = 1.12 ... 1.72$ , what is sufficiently characteristic for the given system of passes.

The aim of the present work is the development of approaches to studying the kinematik parameters of continuous section rolling on the base of the methods of computerized simulation and discovering on this base information about mechanism of changing the technological parameters at the continuous rolling in the system of breakdown passes "oval – square".

**Keywords:** simulation, system of passes, rheology, tension, reduction ratio, rolling.

Система калибров «овал – квадрат» применяется в сортопрокатном производстве в числе других вытяжных систем при прокатке углеродистых и специальных сталей. Технологические основы создания названных систем были заложены достаточно давно, основными подходами при их создании были экспериментальные. Теоретические методы появились и получили свое развитие несколько позже, они продолжали развиваться в работах более позднего и настоящего периода времени

[1-16 и др.]. Разработка технологии прокатки для различных групп сталей на непрерывных станах, выполняется в отсутствие достаточно глубоких сведений о взаимосвязи высотной и поперечной деформаций в условиях переднего, заднего натяжения и совместного их действия. Недостаточно исследованным также, является влияние систем вытяжных калибров на параметры прокатки в непрерывных станах.

Основные сведения о закономерностях изменения технологических параметров и их взаимосвязи при прокатке в калибрах были установлены в результате физического моделирования. Методы компьютерного моделирования, активно развивающиеся в последнее время, позволяют получить дополнительные сведения, однако они не являются достаточными для использования в практических целях. Не все программные средства являются достаточно адаптированными для практических задач. Некоторые программные пакеты по своему замыслу являются специализированными для решения задач сортовой прокатки [17, 18], но и они в прямой форме не обладают достаточными возможностями. Недостаток апробированных решений, вызывает необходимость развития и создания новых научных подходов и делает работы в этих направлениях актуальными.

Целью настоящей работы является развитие подходов к исследованиям кинематических параметров непрерывной сортовой прокатки на основе методов компьютерного моделирования, выявление на этой основе сведений о закономерностях изменения технологических параметров при непрерывной прокатке в системе вытяжных калибров «овал-квадрат».

Исследования параметров прокатки в калибрах системы «овал-квадрат» проводилось с использованием программы компьютерного моделирования процессов обработки металлов давлением FORGE 3D, разработанной компанией TRANSVALOR S.A. FORGE 3D. Основой программы является метод конечных элементов. По утверждению разработчиков она обеспечивает выполнение расчетов технологических параметров с минимальным объемом натуральных экспериментов. Программа предназначена для моделирования технологических процессов обработки металлов давлением в достаточно широкой постановке, в части кинематики и условий трения металла и инструмента.

Расчет формоизменения, полей напряжений, степени деформации и температур основан на минимизации функционала вариационного принципа Лагранжа, функционал которого сформулирован следующим образом:

$$I = \int_V \left( \int_0^H T dH \right) dV - \int_V F_i \cdot U_i dV - \int_S f_i \cdot U_i dS \quad (1)$$

где  $T$  – интенсивность касательных напряжений;  $H$  – интенсивность скоростей деформации сдвига;  $F_i$ ,  $f_i$ ,  $U_i$  – проекции векторов объемных сил, поверхностных нагрузок и скоростей течения, соответственно;  $S$  – площадь поверхности контакта металла с валком;  $V$  – деформируемый объем.

В программе используются конечные элементы в виде тетраэдров с линейной аппроксимацией среднего напряжения и кусочно – линейной аппроксимацией скорости (по угловым узлам элемента и узлу в центре тяжести элемента).

Сопротивление деформации (напряжение текучести) деформируемого материала могут быть заданы на основе данных Хензеля – Шпиттеля [19].

В FORGE 3D доступно 6 моделей для описания трения между деформируемым объектом и инструментом, одной из них является вязкопластическая модель трения:

$$\tau = -\alpha_f \cdot K \cdot |\vartheta_s|^{q-1} \cdot \vartheta_s \quad (2)$$

где  $\alpha_f$  – коэффициент трения, который зависит от нормальных напряжений на контакте;  $q$  – чувствительность к скорости скольжения;  $\vartheta_s$  – разница касательных составляющих скоростей заготовки и инструмента.

Среди других: модель трения Треска, комбинированная модель закона Кулона и модели Треска, модель трения «Nocontact» (модель позволяет не учитывать контакт между инструментом и деформируемым объектом или между двумя деформируемыми объектами), модель трения Бернхардта и модель трения Ноймайера.

Основу тепловой части модели составляет уравнение теплопроводности, приведенное в общем виде:

$$\frac{dt}{dt} = \alpha \cdot \left( \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} \right) + q_{def}, \quad (3)$$

где  $\alpha$  – коэффициент температуропроводности;  $q_{def}$  – тепло, выделяемое при деформации.

Граничные условия при решении температурной задачи:

$$-k \cdot \frac{\partial T}{\partial n} = h_c \cdot (T - T_c) + \varepsilon_r \cdot \sigma_r \cdot (T^4 - T_0^4), \quad (4)$$

где  $n$  – вектор, ортогональный к поверхности;  $T_0$  – температура окружающей среды или инструмента;  $\varepsilon_r$  – степень черноты поверхности;  $\sigma_r$  – константа Больцмана;  $h_c$  – коэффициент теплопередачи.

Исследования проводились для стали 08X13 с химическим составом по ГОСТ 5632-72. Указанная сталь относится к числу тех, которые обладают склонностью к повышенному уширению. Названная особенность сталей изучена в недостаточной степени, и по этой причине возникают трудности при разработке режимов обжатий. Указанные стали содержатся в марочном сортаменте заводов, производящие специальные стали и представляют практический интерес.

Результаты моделирования (табл. 1-3) были предназначены, в частности, для использования в экспериментальных исследованиях. Индексы и символы «Б/н» относятся к прокатке без натяжения, «Н» – к прокатке с натяжением.  $b_1$  и  $F_1$  – соответственно, ширина раската и площадь поперечного сечения после прокатки. Параметр  $h_1$  означает высоту раската после прокатки, численно он равен высоте раската по дну калибра, например, на рис. 2  $h_1=2$  мм.  $V_0$  – скорость раската на входе в очаг деформации,  $V_1$  – скорость прокатки.

Исходные данные и условия моделирования прокатки: скорость вращения валков – 32 об/мин, размеры заготовки – квадрат со стороной 20 мм ( $h_0 = 28,56$  мм;  $b_0 = 28,56$  мм), диаметр по дну калибра – 194 мм.

Свойства деформируемых материалов представлены реологическими зависимостями, приведенными в работе [20], в графическом виде они представлены на рис. 1.

Форма и размеры овального калибра, а также задаваемой в него квадратной заготовки представлены на рис. 2. Параметры названного калибра соответствовали тому, который был предназначен для использовался в экспериментальных исследованиях, этим и обусловлен выбор его размеров и формы.

Таблиця 1. Результати моделювання процесу прокатки по схемі «квадрат-овал» с заднім натяженням

h1, мм	F1, мм <sup>2</sup>			b1, мм			Δb, мм			λ			V <sub>0</sub> /V <sub>0H1</sub>	V <sub>H1</sub> /V <sub>1</sub>	Δb <sub>H1</sub> /Δb	λ <sub>H1</sub> /λ
	Б	Н	Δ, %	Б	Н	Δ, %	Б/н	Н	Δ, %	Б/н	Н	Δ, %				
11	27,15	26,50	-2,437	274,07	269,27	-1,786	7,15	6,50	1,46	1,49	1,754	1,025	0,994	0,910	1,018	
13	24,87	24,46	-1,675	303,54	298,48	-1,693	4,87	4,46	1,32	1,34	1,665	1,025	0,995	0,916	1,017	
14	23,88	23,50	-1,611	317,19	313,16	-1,287	3,88	3,50	1,26	1,28	1,271	1,025	0,995	0,902	1,013	
15	22,99	22,58	-1,822	330,06	324,57	-1,692	2,99	2,58	1,21	1,23	1,663	1,025	0,990	0,862	1,017	
16	22,19	21,88	-1,443	343,16	338,60	-1,347	2,19	1,88	1,17	1,18	1,329	1,025	0,994	0,856	1,013	
17	21,46	21,06	-1,875	356,76	351,02	-1,637	1,46	1,06	1,12	1,14	1,609	1,025	0,990	0,729	1,016	
11	27,15	26,07	-4,112	274,07	264,83	-3,490	7,15	6,07	1,46	1,51	3,372	1,050	0,993	0,850	1,035	
13	24,87	23,82	-4,395	303,54	294,14	-3,197	4,87	3,82	1,32	1,36	3,098	1,050	0,993	0,785	1,032	
14	23,88	23,21	-2,890	317,19	308,73	-2,741	3,88	3,21	1,26	1,30	2,667	1,050	0,992	0,827	1,027	
15	22,99	22,14	-3,830	330,06	321,50	-2,663	2,99	2,14	1,21	1,24	2,594	1,050	0,984	0,716	1,027	
16	22,19	21,57	-2,907	343,16	335,31	-2,341	2,19	1,57	1,17	1,19	2,287	1,050	0,987	0,714	1,023	
17	21,46	20,83	-3,006	356,76	347,92	-2,542	1,46	0,83	1,12	1,15	2,477	1,050	0,976	0,570	1,025	
11	27,15	25,74	-5,463	274,07	261,89	-4,652	7,15	5,74	1,46	1,53	4,445	1,075	0,991	0,803	1,047	
13	24,87	23,71	-4,903	303,54	290,63	-4,442	4,87	3,71	1,32	1,38	4,253	1,075	0,983	0,761	1,044	
14	23,88	22,63	-5,552	317,19	303,68	-4,451	3,88	2,63	1,26	1,32	4,261	1,075	0,981	0,676	1,045	
15	22,99	21,88	-5,047	330,06	317,87	-3,835	2,99	1,88	1,21	1,26	3,693	1,075	0,978	0,630	1,038	
16	22,19	21,22	-4,584	343,16	331,20	-3,611	2,19	1,22	1,17	1,21	3,485	1,075	0,981	0,556	1,036	
17	21,46	20,52	-4,561	356,76	344,12	-3,673	1,46	0,52	1,12	1,16	3,542	1,075	0,960	0,358	1,037	
11	27,15	24,94	-8,827	274,07	256,92	-6,676	7,15	4,94	1,46	1,33	-9,516	1,100	0,982	0,692	0,913	
13	24,87	23,01	-8,072	303,54	286,21	-6,053	4,87	3,01	1,32	1,35	2,182	1,100	0,975	0,619	1,022	
14	23,88	22,35	-6,850	317,19	301,06	-5,360	3,88	2,35	1,26	1,35	6,379	1,100	0,976	0,606	1,068	
15	22,99	21,62	-6,328	330,06	316,56	-4,264	2,99	1,62	1,21	1,36	11,154	1,100	0,967	0,542	1,126	
16	22,19	21,04	-5,497	343,16	329,98	-3,995	2,19	1,04	1,17	1,37	15,224	1,100	0,965	0,473	1,180	
17	21,46	20,31	-5,641	356,76	343,04	-4,000	1,46	0,31	1,12	1,43	21,480	1,100	0,934	0,214	1,274	



Таблиця 2. Результати моделювання процесу прокатки по схемі «квадрат-овал» с переднім натяженням

h1, мм	F1, мм <sup>2</sup>			b1, мм			Δb, мм			λ			V0/Vонт	V111/V1	Δbн/Δb	λн/λ
	Б	Н	Δ, %	Б	Н	Δ, %	Б/Н	Н	Δ, %	Б/Н	Н	Δ, %				
11	27,15	26,77	-1,413	274,07	269,97	-1,522	7,15	6,77	1,46	1,48	1,499	0,989	1,025	0,947	1,015	
13	24,87	24,55	-1,311	303,54	299,20	-1,451	4,87	4,55	1,32	1,34	1,430	0,977	1,025	0,934	1,015	
14	23,88	23,60	-1,196	317,19	311,96	-1,678	3,88	3,60	1,26	1,28	1,651	1,000	1,025	0,927	1,017	
15	22,99	22,65	-1,491	330,06	324,72	-1,646	2,99	2,65	1,21	1,23	1,619	0,980	1,025	0,887	1,016	
16	22,19	21,86	-1,508	343,16	338,31	-1,432	2,19	1,86	1,17	1,18	1,412	0,980	1,025	0,850	1,014	
17	21,46	21,12	-1,593	356,76	351,64	-1,458	1,46	1,12	1,12	1,14	1,435	0,980	1,025	0,769	1,015	
11	27,15	26,26	-3,379	274,07	266,68	-2,771	7,15	6,26	1,46	1,50	2,696	0,993	1,05	0,876	1,028	
13	24,87	24,20	-2,759	303,54	295,26	-2,802	4,87	4,20	1,32	1,35	2,726	0,975	1,05	0,863	1,028	
14	23,88	23,19	-2,973	317,19	308,28	-2,892	3,88	3,19	1,26	1,30	2,811	0,989	1,05	0,822	1,029	
15	22,99	22,35	-2,858	330,06	321,33	-2,718	2,99	2,35	1,21	1,24	2,646	0,969	1,05	0,786	1,027	
16	22,19	21,55	-2,962	343,16	335,15	-2,390	2,19	1,55	1,17	1,19	2,334	0,967	1,05	0,709	1,024	
17	21,46	20,98	-2,293	356,76	347,71	-2,604	1,46	0,98	1,12	1,15	2,536	0,968	1,05	0,670	1,026	
11	27,15	26,03	-4,289	274,07	264,63	-3,568	7,15	6,03	1,46	1,51	3,445	0,958	1,075	0,844	1,036	
13	24,87	23,84	-4,332	303,54	292,09	-3,921	4,87	3,84	1,32	1,37	3,773	0,974	1,075	0,788	1,039	
14	23,88	22,97	-3,983	317,19	305,36	-3,876	3,88	2,97	1,26	1,31	3,731	0,972	1,075	0,764	1,039	
15	22,99	22,02	-4,409	330,06	318,01	-3,791	2,99	2,02	1,21	1,26	3,652	0,963	1,075	0,675	1,038	
16	22,19	21,33	-4,031	343,16	331,51	-3,512	2,19	1,33	1,17	1,21	3,393	0,967	1,075	0,608	1,035	
17	21,46	20,69	-3,688	356,76	345,13	-3,369	1,46	0,69	1,12	1,16	3,258	0,956	1,075	0,476	1,034	
11	27,15	25,73	-5,502	274,07	260,85	-5,069	7,15	5,73	1,46	1,53	4,824	0,953	1,1	0,802	1,051	
13	24,87	23,69	-4,971	303,54	288,65	-5,159	4,87	3,69	1,32	1,39	4,906	0,964	1,1	0,758	1,052	
14	23,88	22,71	-5,147	317,19	301,65	-5,153	3,88	2,71	1,26	1,33	4,900	0,974	1,1	0,699	1,052	
15	22,99	21,84	-5,261	330,06	314,05	-5,097	2,99	1,84	1,21	1,27	4,850	0,947	1,1	0,616	1,051	
16	22,19	21,13	-5,037	343,16	328,37	-4,505	2,19	1,13	1,17	1,22	4,311	0,955	1,1	0,515	1,045	
17	21,46	20,55	-4,392	356,76	343,24	-3,940	1,46	0,55	1,12	1,17	3,790	0,938	1,1	0,381	1,039	



Таблиця 3. Результати моделювання процесу прокатки по схемі «квадрат-овал» с переднім и заднім натяженням

h1, мм	b1, мм			F1, мм <sup>2</sup>			ΔB, мм		λ			V <sub>0</sub> /V <sub>0H</sub> = =V <sub>1H</sub> /V <sub>1</sub>	Δb <sub>H1</sub> /Δb	λ <sub>H1</sub> /λ
	Б	Н	Δ, %	Б	Н	Δ, %	Б/Н	Н	Б/Н	Н	Δ, %			
11	27,15	25,78	-5,279	274,07	262,00	-4,608	7,15	5,78	1,46	1,53	4,405	0,950	1,025	1,046
13	24,87	23,62	-5,291	303,54	290,06	-4,646	4,87	3,62	1,32	1,38	4,439	0,950	1,025	1,046
14	23,88	22,86	-4,456	317,19	306,32	-3,550	3,88	2,86	1,26	1,31	3,428	0,957	1,025	1,035
15	22,99	21,67	-6,075	330,06	315,78	-4,521	2,99	1,67	1,21	1,27	4,326	0,943	1,025	1,045
16	22,19	21,16	-4,901	343,16	332,13	-3,319	2,19	1,16	1,17	1,20	3,212	0,953	1,025	1,033
17	21,46	20,29	-5,731	356,76	340,46	-4,788	1,46	0,29	1,12	1,17	4,567	0,946	1,025	1,048
11	27,15	24,21	-12,130	274,07	250,06	-9,602	7,15	4,21	1,46	1,60	8,761	0,892	1,05	1,096
13	24,87	22,33	-11,387	303,54	281,20	-7,943	4,87	2,33	1,32	1,42	7,359	0,898	1,05	1,079
14	23,88	21,57	-10,710	317,19	292,81	-8,327	3,88	1,57	1,26	1,37	7,687	0,903	1,05	1,083
15	22,99	20,81	-10,461	330,06	310,76	-6,212	2,99	0,81	1,21	1,29	5,848	0,905	1,05	1,062
16	22,19	20,25	-9,578	343,16	324,20	-5,849	2,19	0,25	1,17	1,23	5,526	0,913	1,05	1,058
17	21,46	19,60	-9,470	356,76	333,53	-6,966	1,46	-0,40	1,12	1,20	6,511	0,913	1,05	1,070
11	27,15	22,99	-18,064	274,07	239,22	-14,568	7,15	2,99	1,46	1,67	12,715	0,847	1,075	1,146
13	24,87	21,30	-16,767	303,54	268,45	-13,071	4,87	1,30	1,32	1,49	11,560	0,856	1,075	1,131
14	23,88	20,60	-15,940	317,19	286,22	-10,822	3,88	0,60	1,26	1,40	9,765	0,863	1,075	1,108
15	22,99	20,13	-14,218	330,06	301,57	-9,448	2,99	0,13	1,21	1,33	8,632	0,876	1,075	1,094
16	22,19	19,72	-12,518	343,16	314,82	-9,002	2,19	-0,28	1,17	1,27	8,259	0,889	1,075	1,090
17	21,46	19,16	-12,012	356,76	325,45	-9,620	1,46	-0,84	1,12	1,23	8,774	0,893	1,075	1,096
11	27,15	22,43	-21,025	274,07	232,66	-17,800	7,15	2,43	1,46	1,72	15,110	0,826	1,1	1,178
13	24,87	20,26	-22,747	303,54	256,73	-18,230	4,87	0,26	1,32	1,56	15,419	0,815	1,1	1,182
14	23,88	19,96	-19,644	317,19	273,93	-15,795	3,88	-0,04	1,26	1,46	13,640	0,836	1,1	1,158
15	22,99	19,48	-18,034	330,06	286,42	-15,238	2,99	-0,52	1,21	1,40	13,223	0,847	1,1	1,152
16	22,19	18,93	-17,251	343,16	299,94	-14,409	2,19	-1,07	1,17	1,33	12,594	0,853	1,1	1,144
17	21,46	18,67	-14,957	356,76	313,57	-13,773	1,46	-1,33	1,12	1,28	12,104	0,870	1,1	1,138

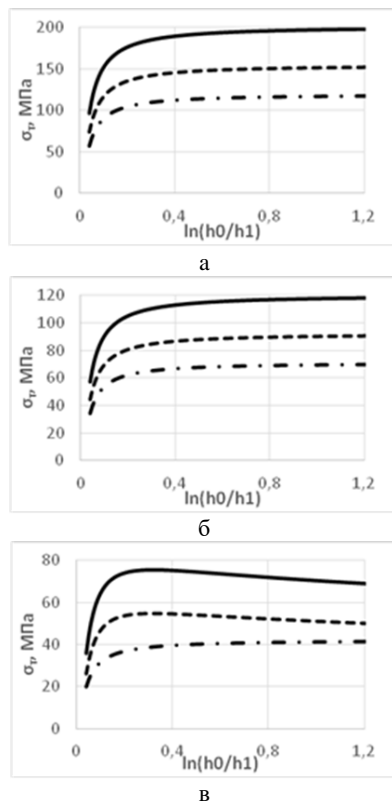


Рис. 1. Реологические зависимости стали 08X13: а) температура деформации 800 °С; б) температура деформации 1000 °С; в) температура деформации 1200 °С;  $u$ : — 10  $c^{-1}$ ;  $u$ : ---- 1  $c^{-1}$ ;  $u$ : - • - 0,1  $c^{-1}$ .

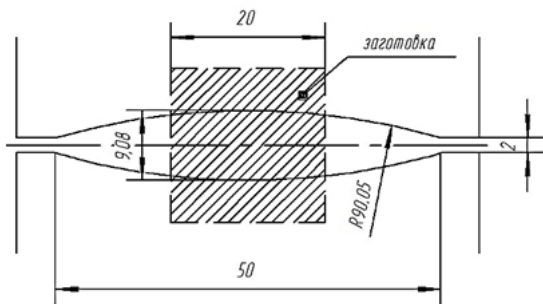


Рис. 2 – Овальный калибр и задаваемый в него профиль

Система «овал – квадрат» рассмотрена на примере схемы «квадрат-овал» при прокатке квадратной заготовки в овальном калибре. Моделирование по указанной схеме выполнялось для случаев прокатки с различными сочетаниями переднего и заднего натяжения. Исследования проводились для условий рассогласования скоростей переднего, заднего, одновременно переднего и заднего концов полосы. Диапазон относительного рассогласования скоростей (по отношению к прокатке без натяжения) составил 2,5...10 % с кратностью 2,5.

Диапазон изменения коэффициентов вытяжки составил  $\lambda=1,12...1,72$ , он является достаточно характерным для данной системы калибров.

**Выводы.** Выполнено моделирование процесса прокатки квадратной заготовки в овальном калибре. Исследованы изменения деформационных и кинематических параметров непрерывной прокатки в

зависимости от варьируемых параметров. Выявлены закономерности изменения параметров прокатки во взаимосвязи друг с другом. Выявлен качественный и количественный (для исследованного диапазона параметров) характер изменения параметров прокатки в зависимости от натяжения (рассогласования скоростей). Предварительное сравнение результатов моделирования и экспериментальных данных позволяют сделать вывод о достаточной их схожести и возможности использования программы FORCE 3D для решения практических задач, связанных с прокаткой в системе калибров «овал-квадрат».

#### Список литературы

1. Dyja H. Using software product FORGE3 for researching of the special steel broadening/ H. Dyja, O. Remez, S. Mroz, A. Samsonenko // Hutnik. Collection of science papers № 5 – 2010 – p. 225–227.
2. Данченко В. Н. Теоретическое исследование изменения ширины профиля при прокатке специальных сталей в калибрах простой формы с использованием программного продукта FORGE3/ В. Н. Данченко., О. А. Ремез, Sebastian Mroz, А. А. Самсоненко // Сборник научных трудов Обработка материалов давлением №1(22) – 2010 – С. 210–217
3. Mroz S. Investigation of wear of roughing stand's rolls of the section mill at rolling of crane rails / S. Mroz, O. Remez, V. Andreiev, A. Samsonenko, M. Kraev, O. Kuzmina // HUTNIK. WIADOMOSCI HUTNICZE. – Tom LXXIX. – # 5. – 2012 – PP. 349–352.
4. Миленин А. А. Проблемы разработки и применения трехмерных численных моделей для оптимизации процессов прокатки / А. А. Миленин // Наукові вісті: Сучасні проблеми металургії. – 2002. – Т. 5. – № 3. – С. 36–46.
5. Modelowanie procesow kucia swobodnego: seria "Metalurgia" / [H. S. Dyja, G. A. Banaszek, V. A. Grynkevych, V. N. Danchenko]. – Czestochowa, 2004. – No 42 – 355 p.
6. Strain and stress analysis in forward extrusion process of bimetallic rods / Berski S., Dyja H., Milenin A. [та інш.] // Наукові вісті. Сучасні проблеми металургії. Пластична деформація металів. – 2002. – Т. 5. – С. 250–254.
7. Выдрин В. Н. Процесс непрерывной прокатки / В. Н. Выдрин, А. С. Федосиенко, В. И. Крайнов. – М.: Металлургия, 1970. – 456 с.
8. Онищенко И. И. Теория непрерывной прокатки / И. И. Онищенко, П. И. Куценко, А. И. Куценко. – Запорожье: Изд-во ЗГИА, 1998 – 470 с.
9. Непрерывная прокатка / Коллективная монография под редакцией д. т. н., проф. В. Н. Данченко. – Днепропетровск: РВА «Дніпро-ВАЛ», 2002. – 588 с. – ISBN 966-7616-40-1.
10. Чекмарев А. П. Межклетевое натяжение при непрерывной прокатке / А. П. Чекмарев, И. А. Чекмарев, А. Я. Семенюта // Обработка металлов давлением: сборник научных трудов ДМетИ. – М.: Металлургия, 1970. – № 55. – С. 5–7.
11. Предельные значения динамического и кинематического натяжения при непрерывной прокатке / А. П. Чекмарев, В. И. Прокофьев, А. А. Динник [и др.] // Обработка металлов давлением: сборник научных трудов ДМетИ. – М.: Металлургия, 1970. – № 55. – С. 7–14.
12. Чекмарев А. П. Деформация полосы в межклетевом пространстве при непрерывной прокатке с натяжением / А. П. Чекмарев, И. И. Онищенко // Обработка металлов давлением: сборник научных трудов ДМетИ. – М.: Металлургия, 1965. – № 49. – С. 24–40.
13. Комплексное исследование процесса непрерывной прокатки / [А. П. Чекмарев, И. И. Онищенко, В. В. Гетманец, М. П. Топоровский] // Обработка металлов давлением: сборник научных трудов ДМетИ. – М.: Металлургия, 1965. – № 49. – С. 41–73.
14. Мутьев М. С. Исследование процесса прокатки с натяжением / М. С. Мутьев, Л. Н. Левченко, Л. Ф. Машкин // Обработка металлов давлением: сборник научных трудов ДМетИ. – М.: Металлургия, 1965. – № 49. – С. 73–87.

15. Динник А. А. Исследование межклетевой деформации полосы на непрерывном проволочном стане / А. А. Динник, Л. Б. Черногоров, А. Н. Комаров // Обработка металлов давлением: сборник научных трудов ДМетИ. – М.: Металлургия, 1965. – № 49. – С. 104–110.
16. К вопросу определения межклетевых деформаций при горячей прокатке на непрерывных станах / [В. И. Тарновский, А. А. Поздеев, В. И. Еремеев, А. Г. Криволапов] // Сборник научных трудов: Челябинский политехнический институт. – Челябинск, 1968. – № 54. – С. 29–39.
17. Миленин А. А. Разработка научных основ и развитие технологий трехмерного пластического формоизменения металлов с применением методов компьютерного моделирования: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук: 05.03.05 / Миленин Андрей Анатольевич. – Днепропетровск, 2001. – 320 с.
18. Ершов С. В. Развитие теории напряженно-деформированного состояния металла при прокатке крупных круглых профилей с пониженным трещинообразованием в системе сортовых калибров: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук: 05.03.05 / Ершов Сергей Владимирович. – Днепропетровск, 2008. – 301 с.
19. Хензель А. Расчет энергосиловых параметров в процессах обработки металлов давлением / А. Хензель, Т. Шпиттель. – М.: Металлургия, 1982. – 360 с.
20. Полухин П. И./ Сопrotivление пластической деформации металлов и сплавов // П. И. Полухин, Г. Я. Гун, А. М. Галкин. – М.: Металлургия, 1976. – 488 с.
9. Nepreryvnaya prokatka / Kollektivnaya monografiya pod redaktsiyey d. t. n., prof. V. N. Danchenko. – Dnipropetrovsk: RVA «Dnipro-VAL», 2002. – 588 p. – ISBN 966-7616-40-1.
10. Chekmarev A. P. Mezhhkletevoye natyazheniye pri nepreryvnoy prokatke / A. P. Chekmarev, I. A. Chekmarev, A. YA. Semenyuta // Obrabotka metallov davleniyem: sbornik nauchnykh trudov DMetI. – Moscow: Metallurgiya, 1970. – No55. – P. 5–7.
11. Predel'nyye znacheniya dinamicheskogo i kinemacheskogo natyazheniya pri nepreryvnoy prokatke / A. P. Chekmarev, V. I. Prokof'yev, A. A. Dinnik [i dr.] // Obrabotka metallov davleniyem: sbornik nauchnykh trudov DMetI. – Moscow: Metallurgiya, 1970. – No 55. – P. 7–14.
12. Chekmarev A. P. Deformatsiya polosy v mezhhkletevom prostranstve pri nepreryvnoy prokatke s natyazheniyem / A. P. Chekmarev, I. I. Onishchenko // Obrabotka metallov davleniyem: sbornik nauchnykh trudov DMetI. – Moscow: Metallurgiya, 1965. – No 49. – P. 24–40.
13. Kompleksnoye issledovaniye protsessu nepreryvnoy prokatki / [A. P. Chekmarev, I. I. Onishchenko, V. V. Getmanets, M. P. Toporovskiy] // Obrabotka metallov davleniyem: sbornik nauchnykh trudov DMetI. – Moscow: Metallurgiya, 1965. – No 49. – P. 41–73.
14. Mut'yev M. S. Issledovaniye protsessu prokatki s natyazheniyem / M. S. Mut'yev, L. N. Levchenko, L. F. Mashkin // Obrabotka metallov davleniyem: sbornik nauchnykh trudov DMetI. – Moscow: Metallurgiya, 1965. – No 49. – P. 73–87.
15. Dinnik A. A. Issledovaniye mezhhkletevoy deformatsii polosy na nepreryvnom provolochnom stane / A. A. Dinnik, L. B. Chernogorov, A. N. Komarov // Obrabotka metallov davleniyem: sbornik nauchnykh trudov DMetI. – Moscow: Metallurgiya, 1965. – No 49. – P. 104–110.
16. K voprosu opredeleniya mezhhkletevykh deformatsiy pri goryachey prokatke na nepreryvnykh stanakh / [V. I. Tarnovskiy, A. A. Pozdееv, V. I. Yermeyev, A. G. Krivolapov] // Sbornik nauchnykh trudov: Chelyabinskii politekhnicheskii institut. – Chelyabinsk, 1968. – No 54. – P. 29–39.
17. Milenin A. A. Razrabotka nauchnykh osnov i razvitiye tekhnologiy trekhmernogo plasticheskogo formoizmeneniya metallov s primeneniyyem metodov komp'yuternogo modelirovaniya: dissertatsiya na soiskaniye uchenoy stepeni doktora tekhnicheskikh nauk: 05.03.05 / Milenin Andrey Anatol'yevich. – Dnepropetrovsk, 2001. – 320 p.
18. Yershov S. V. Razvitiye teorii napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya metalla pri prokatke krupnykh kruglykh profiley s ponizhennym treshchinoobrazovaniyyem v sisteme sortovykh kalibrov: dissertatsiya na soiskaniye uchenoy stepeni doktora tekhnicheskikh nauk: 05.03.05 / Yershov Sergey Vladimirovich. – Dneprodzerzhinsk, 2008. – 301 p.
19. Khenzel' A. Raschet energosilovykh parametrov v protsessakh obrabotki metallov davleniyem / A. Khenzel', T. Shpittel'. – Moscow: Metallurgiya, 1982. – 360 p.
20. Polukhin P. I./ Sopotivleniye plasticheskoy deformatsii metallov i spлавov // P. I. Polukhin, G. YA. Gun, A. M. Galkin. – Moscow: Metallurgiya, 1976. – 488 p.

## References (transliterated)

1. Dyja H. Using software product FORGE3 for researching of the special steel broadening/ H. Dyja, O. Remez, S. Mroz, A. Samsonenko // Hutnik. Collection of science papers No 5 – 2010 – p. 225–227.
2. Danchenko V. N. Teoreticheskoye issledovaniye izmeneniya shiriny profilya pri prokatke spetsial'nykh staley v kalibrakh prostoy formy s ispol'zovaniyyem programmnoy produkta FORGE3/. V. N. Danchenko., O. A. Remez, Sebastian Mroz, A. A. Samsonenko // Sbornik nauchnykh trudov Obrabotka metallov davleniyem No1(22) – 2010 – P. 210–217
3. Mroz S. Investigation of wear of roughing stand's rolls of the section mill at rolling of crane rails / S. Mroz, O. Remez, V. Andriev, A. Samsonenko, M. Kraev, O. Kuzmina // HUTNIK. WIADOMOSCI HUTNICZE. – Vol. LXXIX. – No 5. – 2012 – PP. 349–352.
4. Milenin A. A. Problemy razrabotki i primeneniya trekhmernykh chislennykh modeley dlya optimizatsii protsessov prokatki / A. A. Milenin // Naukovi visti: Suchasni problemi metalurgii. – 2002. – Vol. 5. – No 3. – P. 36–46.
5. Modelowanie procesow kucia swobodnego: seria "Metalurgia" / [H. S. Dyja, G. A. Banaszek, V. A. Grynkewych, V. N. Danchenko]. – Czestochowa, 2004. – No 42 – 355 p.
6. Strain and stress analysis in forward extrusion process of bimetallic rods / Berski S., Dyja H., Milenin A. [ta insh.] // Naukovi visti. Suchasni problemy metalurhiyi. Plastychna deformatsiya metaliv. – 2002. – Vol. 5. – P. 250–254.
7. Vydrin V. N. Protsess nepreryvnoy prokatki / V. N. Vydrin, A. S. Fedosiyenko, V. I. Kraynov. – Moscow: Metallurgiya, 1970. – 456 p.
8. Onishchenko I. I. Teoriya nepreryvnoy prokatki / I. I. Onishchenko, P. I. Kutsenko, A. I. Kutsenko. – Zaporozh'ye: Izd-vo ZGIA, 1998 – 470 p.

Поступила (received) 10.11.2018

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

**Ремез Олег Анатольевич (Ремез Олег Анатолійович, Remez Oleg Anatolevich)** – кандидат технічних наук, Національна металургічна академія України, доцент кафедри обробки металів тисненням ім. А.П. Чекмарєва, тел.: (098) 757-31-82, e-mail: remez@metal-forming.org.

**Огинский Иосиф Кузьмич (Огінський Йосип Кузьмич, Oginski Joseph Kuzmich)** – доктор технічних наук, Запорозька державна інженерна академія, завідує кафедрою «Металургічного обладнання», тел. (067)8696733, e-mail: oginskyu@gmail.com

**Б. П. СЕРЕДА, И.В. КРУГЛЯК, А.С. ГАЙДАЕНКО**

### **ПОЛУЧЕНИЕ ИНОВАЦИОННЫХ АЛИТИРОВАННЫХ ПОКРЫТИЙ НА КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ, РАБОТАЮЩИХ В УСЛОВИЯХ КОКСОХИМИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА**

В статье рассматриваются получение коррозионноустойчивых алитированных покрытий на стальных и медных подложках. Коррозионноустойчивые покрытия получали в режиме теплового самовоспламенения СВС-шихт. Данный вид защиты является наиболее перспективным и менее дорогостоящим. В настоящей работе исследовали возможность нанесения покрытий в неизотермических условиях. Сталь с нанесенными защитными алитированными покрытиями, показали увеличение коррозионной стойкости в 1,6–1,8 раза, по сравнению с материалом, обработанным при изотермических условиях при эксплуатации оборудования в условиях коксохимического производства.

**Ключевые слова:** самораспространяющийся высокотемпературный синтез, сталь, коррозионная стойкость, алитирование, коксохимическое производство.

**Б. П. СЕРЕДА, І.В. КРУГЛЯК, А.С. ГАЙДАЄНКО**

### **ОТРИМАННЯ ІНОВАЦІЙНИХ АЛІТІВАННИХ ПОКРИТТІВ НА КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛАХ ПРАЦЮЮЧИХ В УМОВАХ КОКСОХІМІЧНОГО ВИРОБНИЦТВА**

У статті розглядаються отримання корозійностійких алітування покриттів на сталевих підкладках. Корозійностійкі покриття отримували в режимі теплового самозаймання СВС-шихт. Даний вид захисту є найбільш перспективним і менш дорогим. Даний вид захисту є найбільш перспективним і менш дорогим. У даній роботі досліджували можливість нанесення покриттів в неизотермічних умовах. Сталь з нанесеними захисними алітованими покриттями, показали збільшення корозійної стійкості в 1,6–1,8 рази, в порівнянні з матеріалом, обробленим при ізотермічних умовах при експлуатації обладнання в умовах коксохімічного виробництва.

**Ключові слова:** високотемпературний синтез, сталь, корозійна стійкість, алітування, коксохімічне виробництво.

**B. P. SEREDA, I.V. KRUGLYAK, A.S. GAYDAENKO**

### **OBTAINING OF THE INNOVATIVE ALITED COATINGS ON CONSTRUCTION MATERIALS WORKING IN THE CONDITIONS OF COXOCHEMICAL MANUFACTURE**

The article discusses the production of corrosion resistant aluminized coatings on steel and copper substrates. Corrosion-resistant coatings were obtained in the thermal self-ignition mode of SHS-charge. This type of protection is the most promising and less expensive. In this paper, we investigated the possibility of applying coatings in non-isothermal conditions. The composition of the saturating medium was chosen based on the requirements for corrosion-resistant coatings and the peculiarities of the formation of protective coatings on steel and copper materials. Steel coated with protective aluminized coatings, showed an increase in corrosion resistance of 1.6–1.8 times, compared with the material treated under isothermal conditions during operation of equipment in terms of coke production. Coke-chemical production is characterized by a very high aggressiveness of the enterprise atmosphere, thermal effects on the working bodies of machines and structures, abrasiveness of coke dust, adhesion to the surface of condensate equipment, resins, fuses, etc. For the production environment of a coke-chemical enterprise, uneven distribution of aggressive substances in the working area is typical. To protect structural materials from corrosive effects, an innovative method has been proposed for obtaining protective corrosion-resistant coatings in the thermal self-ignition mode under conditions of self-propagating high-temperature synthesis.

**Keywords:** self-propagating high-temperature synthesis, steel, corrosion resistance, aluminizing, coke-chemical production.

**Введение.** Для деталей, работающих при воздействии коррозионных сред коксохимического производства, актуальным является защита их поверхности. Для защиты конструкционных материалов от коррозионного воздействия, в работе предложен инновационный метод получения защитных коррозионноустойчивых покрытий в режиме теплового самовоспламенения в условиях самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС). [1–2]

Алитирование – (от нем. фирменного термина alitieren, от Al – алюминий) процесс насыщения алюминием поверхностных слоев стальных и чугунных изделий с целью повышения жаростойкости (окалиностойкости до  $t$  1100°C) и атмосферной коррозионно стойкости. Алитирование производят в твердой, жидкой и газовой средах, однако в промышленности наибольшее применение находит способ алитирования в порошкообразных смесях и ваннах с расплавленным алюминием (твердая среда) [3–4]. Нанесенное покрытие имеет на порядок более высокую стойкость к абразивному износу, чем любой лакокрасочный материал. Для повышения защиты

возможно комплексное использование металлического покрытия с последующей пропиткой полимерной композицией. Металлическое покрытие обеспечивает защиту от коррозии и износа, полимер закрывает поры и обеспечивает дополнительную защиту поверхности. Комплексное покрытие обеспечивает 20–25 лет службы без коррозии.

Защита от коррозии и износа поверхностей погружного нефтедобывающего оборудования. Погружные электроцентробежные насосы и насосно-компрессорные трубы работают на глубинах в тысячи метров, подвергаясь износу при спускоподъемных операциях, соляной и сероводородной коррозии при повышенных температурах. Высоко-скоростное напыление порошкового нержавеющей сплава на основе железа позволяет надежно защитить корпус оборудования, а близость электрохимических потенциалов позволяет предотвратить подпленочную коррозию.

Безаварийная эксплуатация конструкций зданий и сооружений является обязательным условием стабильного развития предприятия.

Диффузионному легированию поверхности меди и ее сплавов алюминием посвящено больше число работ. Природа фаз, возникающих при диффузии алюминия в медь, определяется бинарной диаграммой состояния медь-алюминий. Из анализа диаграммы состояния Cu-Al следует, что диффузия алюминия в медь должна происходить прежде всего в  $\alpha$ -фазе. Растворимость алюминия в меди изменяется от 7,5 вес % при 1035 °С до 9,4 вес % при комнатной температуре.

Помимо  $\alpha$ -фазы в системе установлено наличие следующих фаз:  $\beta$ -фазы твердого раствора на основе электронного соединения  $AlCu_3$ , имеющего О.Ц.К. решетку,  $\gamma_2$ -фазы – твердого раствора на основе соединения  $Cu_9Al_4$  (31,3 – 35,3 ат % Al) и  $Cu_{32}Al_{19}$  (35,8 – 38,1 ат % Al),  $\delta$ -фазы, содержащей 38,1 – 40,9 ат % Al. При формировании алитированного слоя принципиально возможно образование вышеуказанных фаз. В вышеуказанных работах процесс осуществляется газовым методом контактным способом, и исследователи наблюдали образование в диффузионном слое почти всех перечисленных фаз, в зависимости от условий насыщения.

Анализ возрастного состава производственных объектов ПАО «Авдеевский КХЗ» показывает, что около 25% имеют срок службы свыше 35 лет, 20% характеризуются возрастом свыше 25 лет, 40% – от 15 до 25 лет и 15% – до 15 лет. Анализ зарубежного опыта в области снижения рисков аварийных ситуаций техногенного характера свидетельствует, что система техногенно-экологической безопасности должна включать показатели технического состояния основных производственных фондов [5].

Коксохимическое производство характеризуется весьма высокой агрессивностью атмосферы предприятия, термическими воздействиями на рабочие органы машин и конструкции, абразивностью коксовой пыли, адгезией к поверхности аппаратуры конденсата, смол, фусов и т. п. Для производственной среды коксохимического предприятия свойственна неравномерность распределения агрессивных веществ в рабочей зоне. Источники агрессивного воздействия на материал конструкции можно разделить на источники энергетического и химического воздействия. Состав и концентрация компонентов эксплуатационной среды в результате физико-химических процессов коксохимического производства соответствует средне- и сильноагрессивным воздействиям на строительные конструкции зданий и сооружений. Обеспечение постоянного уровня надежности и долговечности эксплуатируемых конструкций связано с эффективной организацией службы технической эксплуатации, которая осуществляет надзор за конструкциями собственными силами или путем привлечения специализированных организаций.

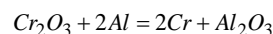
Целью надзора является своевременное выявление и правильная оценка существующих дефектов и повреждений стальных конструкций. Надзор включает текущие и периодические осмотры конструкций, а также специальное обследование.

Изменение характеристик процесса разрушения протекает в различные периоды эксплуатации основных металлоконструкций и в различных зонах завода по-разному. Поэтому важно установить некоторые средние значения этих характеристик и общие закономерности процесса разрушения основных металлоконструкций на коксохимических предприятиях.

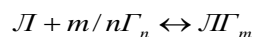
Работоспособность и долговечность покрытия в значительной степени зависит от защитного действия образующегося оксидного слоя, который препятствует диффузионному рассасыванию покрытия. Поскольку при высокотемпературном взаимодействии с кислородом преимущественно образуются оксиды легкоокисляющихся компонентов покрытия (т.е. имеющих высокое сродство к кислороду), то наиболее часто в состав коррозионностойких покрытий вводят такие элементы как *Cr, Ti, Al, Si, Zr* и др., имеющие высокое сродство к кислороду и образующие на поверхности тугоплавкие оксиды этого элемента ( $Al_2O_3, SiO_2$  и др.) [6].

**Объекты и методы исследования.** В настоящей работе исследовали возможность нанесения покрытий в неизотермических условиях. В качестве материалов, на которые наносили коррозионностойкие покрытия, были выбраны: сталь 45 и бронза БрАЖМц10-3-1,5.

Состав насыщающей среды выбирали исходя из требований к коррозионностойким покрытиям и особенностям формирования защитных покрытий на стальных и медных материалах. Для постановки экспериментов применяли порошки: использовали  $Cr_2O_3$  – оксид хрома (III), Al – алюминий марки АПВ,  $Al_2O_3$  – оксид алюминия (III),  $J_2$  – металлический йод дисперсностью 200-350 мкм. Высокая температура процесса, необходимая для быстрого протекания реакций, создаётся в результате освобождения химической энергии восстановления оксида хрома алюминием по реакции



Возможность осуществления химических транспортных реакций в волне горения основана на том, что в процессе горения происходит последовательная смена температурных режимов, и температура в каждой точке смеси возрастает непрерывно от  $T_0$  до  $T_{max}$ . [7-8]. В этих условиях, при очень малой длине диффузионного пути, резко возрастает интенсивность диффузионного переноса газообразных компонентов, которые участвуют в химических транспортных реакциях, которые протекают по реакции типа



где  $L$  – легирующий компонент покрытия;  $\Gamma_n$  – галоген (активатор процесса);  $L\Gamma_n$  – летучий галогенид.

Для переноса и осаждения элемента  $L$  необходимо наличие сдвига равновесия реакции в соответствующую сторону, при этом элемент и изделие должны находиться в неординарных температурных условиях. Если скорости химических

реакций не лимитируют процесс, то концентрация активных газов-переносчиков может оказывать влияние на интенсивность роста диффузионного слоя. Для оценки роли субгалогенидов при поверхностном насыщении и факторов, влияющих на равновесную концентрацию субгалогенидов, необходимо термодинамически проанализировать химические реакции, возможные в реакционном пространстве [10–12]

Открытие и исследование самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) позволило связать структуру образующихся при горении материалов с кинетикой быстрых экзотермических реакций.

Твердое пламя, как физико-химическое явление, может реализовываться при соблюдении двух условий:

- смесь исходных реагентов должна быть высокодисперсной и обладать большим запасом химической энергии (высокой теплотворной способностью) для того, чтобы обеспечить необходимые для быстрого взаимодействия твердых веществ высокие температуры горения [9];

- продукты горения должны быть тугоплавкими, чтобы при высоких температурах горения находиться в твердом состоянии.

Твердое пламя в чистом виде – редкое явление, оно может иметь место только в системах с очень развитой поверхностью контакта реагентов. Пример тому – горение смеси лакированных порошков, в которых частицы одного вещества покрыты слоем другого, что обеспечивает достаточно большую удельную поверхность контакта реагентов, если, конечно, частицы достаточно малы. Микронные размеры в таких условиях являются удовлетворительными. Если частицы не плавятся, то взаимодействие между реагентами происходит твердофазным путем в режиме реакционной диффузии. Низкие значения констант массопереноса в твердой фазе могут быть скомпенсированы большой поверхностью контакта. Высокая температура является важным интенсифицирующим фактором. Режим чистого твердого пламени может быть реализован в случае, при котором все вещества (не только исходные и конечные, но и промежуточные) находятся в твердом состоянии.

Близкие с точки зрения реакционной диффузии процессы могут протекать в системах, в которых один реагент является порошком, а другой газом. Здесь также поверхность контакта реагентов должна быть высокой. Наиболее сложна картина в реальных порошковых смесях, состоящих из частиц разного сорта. Малая поверхность контакта частиц не способна обеспечить чисто твердофазный режим горения, и распространение волны горения возможно лишь при наличии дополнительных интенсифицирующих факторов, таких как действие регенерируемых газовых молекул – переносчиков (обеспечивающих газотранспортный перенос реагентов) или контактное плавление за счет образования легкоплавких эвтектических смесей.

Возможны ситуации, когда один из реагентов полностью плавится или газифицируется, однако продукты при этом образуются полностью в твердом состоянии. Именно твердое пламя с разнообразием форм превращения вещества легло в основу метода СВС. Организация СВС заключается в создании порошковой смеси и окружающей среды, обеспечивающих экзотермичность взаимодействия при локальном инициировании процесса (зажигании). Затем происходит самопроизвольное распространение волны реакции (горения) и остывание синтезированного продукта. СВС – процессы различаются химической природой реагентов, составом и структурой шихты, параметрами окружающей среды, возможными внешними воздействиями – энергетическими и механическими. Все эти факторы влияют на условия процесса, характер и скорость распространения фронта горения, зонную структуру волны горения (тепловую и концентрационную), механизм химических и структурных превращений в волне, максимальную температуру, пост – процессы в продуктах горения (структурные превращения и остывание). В настоящее время методом СВС получено свыше 500 различных продуктов. Это карбиды, бориды, нитриды, силициды, интерметаллиды, халькогениды, гидриды, оксиды и др. К этому перечню следует добавить твердые растворы элементов, твердые растворы бинарных соединений (типа карбонитридов), нестехиометрические фазы, фазы высокого давления и др.

Химия СВС – процессов играет важную роль в выборе систем и создании условий для решения той или иной задачи синтеза.

Традиционная химия горения рассматривает преимущественно реакции термического разложения и окисления всевозможных топлив: натуральных и синтетических, органических и неорганических, твердых, жидких и газообразных.

Подбор горючих систем основан на поисках наиболее калорийных составов, при горении которых выделяется как можно больше энергии. Обычно химическая энергия топлив выделяется в виде тепловой энергии газообразных продуктов горения, пути превращения которой в другие виды энергии хорошо известны.

Подбор СВС – систем основан на принципах технологического горения. Основной признак – образование полезного продукта в результате экзотермической реакции, причем величина теплового эффекта представляет интерес лишь в той мере, в какой способна обеспечить сам процесс горения. Такой подход привлекает к рассмотрению большое количество разнообразных горючих систем и химических реакций. Тем не менее, наибольшее распространение получили реакции синтеза – как основная (или единственная) химическая стадия процесса.

Покрытия, наносимые в СВС-процессах при протекании сопутствующих газотранспортных



реакций, весьма своеобразны. Они состоят из пленки наносимого продукта как при газофазном осаждении и широкой переходной диффузионной (градиентной) зоны как при диффузионном насыщении. Как следствие этого, газотранспортные СВС-покрытия обладают лучшими чертами своих аналогов – они имеют свойства наносимого материала (т.е. могут быть намного более износостойкими или жаростойкими, чем основа) и высокую адгезионную прочность. Диффузионное насыщение в порошковых смесях относится к категории процессов порошковой металлургии.

Наиболее распространены в настоящее время два типа СВС-покрытий: хромборидные и хромкарбидные на стальные детали и нитридтитановые на твердые сплавы (режущие пластины). Для первого типа промышленным аналогом являются диффузионное насыщение, для второго – газофазное осаждение (ионно-плазменное напыление в установках типа «Булат»)[9].

Замечательные черты СВС и его экстремальные физические параметры определили высокую технологическую и экономическую эффективность СВС-технологии. Высокая температура горения является одним из важнейших факторов. Она выше, чем в ПС, но ниже, чем в плазмохимическом синтезе (ПХС) и находится в пределах 800-4500 °С в зависимости от термохимических свойств шихты. Высокие температуры обеспечивают кинетическую (диффузионную) полноту взаимодействия реагентов, способствуют самоочистке от примесей. Это обеспечивает получение продуктов высокой чистоты. В то же время высокие температуры ускоряют протекание рекристаллизационных процессов и способствуют росту зерен, что снижает прочность материала. Поэтому большое значение имеет регулирование температуры горения. В практике СВС получили распространение два приема: разбавление шихты конечным продуктом (уменьшение температуры) и введение дополнительной энергии путем подогрева шихты (увеличение температуры) [9].

Большие скорости распространения волны горения вместе с высокой температурой определяют малые времена синтеза и большую производительность процесса. Типичные значения линейной скорости горения составляют 0,5-5 см/сек, а в некоторых случаях она может достигать и больших значений (до 20 см/сек). Часто в самой волне не успевают завершиться реакции синтеза, и имеет место объемное дореагирование и образование конечной структуры продуктов за фронтом горения. Но и такой процесс протекает достаточно быстро из-за высоких температур горения.

Большие скорости сгорания изменяют соотношение длительностей различных технологических стадий. Если в печной технологии синтез – одна из самых медленных стадий в общем цикле сырье – продукты, то в СВС-технологии это самая быстрая стадия. Благодаря этому обстоятельству промышленная организация СВС ставит задачу совершенствования вспомогательных операций.

## Результаты и их обсуждение.

Термодинамический анализ химико-термической обработки углерод-углеродных материалов в условиях СВС, с варьированием количественного состава легирующих компонентов, а также количества газотранспортного агента, был проведен при помощи комплекса прикладных программ «АСТРА» и «Terra». Расчеты производили в интервале температур от 100 до 1600 °С с шагом через каждые 100 °С, давление было установлено 0.1 МПа. Расчет вели для системы  $Cr_2O_3 + Al + Al_2O_3 + I_2 + NH_4Cl$  и исследуя термодинамическую возможность обмена легирующих компонентов с углеродной подложкой.

Для процесса химико-термической обработки в условиях СВС, использовали реактивы классификации «ч» и «чда». Порошки просушивали при температурах 100...400 °С на протяжении 1...2 часов в печах лабораторного типа, затем перемешивали порошки в процентном соотношении, перемешивание длилось 30...45 мин. Насыщение поверхности конструкционных материалов проводили в СВС-реакторах в условиях теплового самовоспламенения в интервале температур 900...1050 °С в течении 60 минут. Температура процесса контролировалась вольфрам-рениевой термопарой, которая была расположена в кварцевой трубке и введена в СВС-смесь. Термопара подключалась к регистратору серии КСПП-4.

Испытания на коррозионную стойкость осуществляется согласно ГОСТ Р 9.905-2007 (ИСО 7382: 2001, ИСО 11845: 1995) и ГОСТ 9.908-85 на плоских образцах 50x50 мм толщиной 3 мм. Образцы с покрытиями на исследуемых конструкционных материалах исследуются в 20% – водных растворах соляной, серной и азотной кислот (при 20 °С). Упрочненные конструкционные материалы показали увеличение коррозионной стойкости в 1,6–1,8 раза по сравнению с материалом, обработанным при изотермических условиях

**Выводы.** Из полученных данных термодинамического и фазового анализов установлено, что формирование алитированных защитных покрытий в условиях СВС (в изученных системах порошков насыщающих шихт) на стали и бронзе происходит образование начального диффузионного слоя алюминия. Получение защитные покрытия при нестационарных температурных условиях, обеспечивает высокую коррозионную стойкость деталей, что в 1,6–1,8 раза выше по сравнению с материалом, обработанным при изотермических условиях.

## Список литературы

1. Мержанов А.Г. Твердо-плазменное горение / Мержанов А.Г. – Черноголовка: ИСМАН, 2000. – 244 с.
2. Г.В. Самсонов, А.П. Эпик. Покрытия из тугоплавких соединений. – Москва: Металлургия, 1964. – 108 с.
3. Интернет ресурс: [conf.sfu-kras.ru/sites/mn2010/pdf/1/12e.pdf](http://conf.sfu-kras.ru/sites/mn2010/pdf/1/12e.pdf)
4. Химико-термическая обработка металлов и сплавов. Справочник. Борисенко Г.В., Васильев Л.А., Ворошнин Л.Г. и др. М.: Металлургия, 1981. – 424 с.
5. Гайдаенко А. С. Влияние технологических факторов на безопасность эксплуатации конструкций зданий и

- сооружений / Збірник наукових праць Українського інституту сталевих конструкцій імені В.М. Шимановського. – К.: Вид-во «Сталь». – Вип. 7. – 2011. – С. 96–102
6. Серета Б.П. Поверхневе зміцнення матеріалів: Монографія / Серета Б.П., Калініна Н.С., Кругляк І.В. – Запоріжжя: РВВ ЗДІА– 2004. – 230 с.
  7. Sereda B. Corrosion Resistance and Mechanical Properties Zinc Coating Sheet Steels, Received in Conditions of Self-propagating High Temperature Synthesis / Sereda D., Sereda B. // Material science and technology– 2016. Salt Lake City, Utah USA 2016. – P.825–829.
  8. Применение ЭВМ для термодинамических расчетов металлургических процессов / [Синярев Г. Б., Ватолин Н. А., Трусов Б. Г., Моисеев Р. К. и др.]. – М.: Наука, 1982. – 263 с.
  9. Мержанов А.Г. Процессы горения и синтез материалов / под ред. В.В. Теплы, А.В. Хачояна. – Черноголовка: ИСМАН. – 1998. – 512 с.
  10. Sereda B., Sereda D. Kinetics formation of aluminized multifunctional coating on steel in SHS condition. Material science and technology. Columbus, Ohio, USA. 2011. --P. 1667-1671.
  11. Sereda B. Advanced Chromoaluminizing Coatings for Wear and Heat-resistance on Composite Materials under SHS. / Sereda D., Sereda B. // Material science and technology. Columbus, OH, USA, 2015. – P. 229–232.
  12. Sereda B. Aluminized Multifunctional Coating on Steel in SHS Condition./ Sereda D., Sereda B. //Material science and technology. Pittsburgh. Pennsylvania, USA 2014. – P.482-486.
- References (transliterated)**
1. Merzhanov A.G. Solid-flame burning / Merzhanov AG – Chernogolovka: ISMAN, 2000. – 244 p (in Russian).
  2. G.V. Samsonov, A.P. Epic. Coatings of refractory compounds. – Moscow: Metallurgy, 1964. – 108 p (in Russian).
  3. Internet resource: conf.sfu-kras.ru/sites/mn2010/pdf/1/12e.pdf (in Russian).
  4. Chemical heat treatment of metals and alloys. Directory. Borisenok G.V., Vasilyev L.A., Voroshnin L.G. and others. Moscow: Metallurgy, 1981. – 424 p (in Russian).
  5. Gaydaenko A.S. The influence of technological factors on the safety of building structures and structures operation / Collection of scientific works of the Ukrainian Institute of Steel Structures named after V.M. Shimanovsky – Kiev: View of "Steel". – No 7 – 2011. – P. 96-102 (in Russian).
  6. Sereda B.P. Poverneve zmitsnennya material: Monographs / Sereda B.P., Kalinina N.S., Kruglyak I.V. – Zaporizhzhya: RVV ZDIA – 2004. – 230 p (in Russian).
  7. Sereda B. Corrosion Resistance and Mechanical Properties Zinc Coating Sheet Steels, Received in Conditions of Self-propagating High Temperature Synthesis / Sereda D., Sereda B. // Material science and technology– 2016. Salt Lake City, Utah USA 2016. – P.825-829 (references).
  8. The use of computers for thermodynamic calculations of metallurgical processes / [Sinyarev G. B., Vatin N. A., Trusov B. G., Moiseev R. K., et al.]. – Moscow: Science, 1982. –263 p. (in Russian).
  9. Merzhanov A.G. Combustion processes and materials synthesis / ed. V.V. Telepy, A.V. Khachoyan. – Chernogolovka: Isman. – 1998. – 512 p (in Russian).
  10. Sereda B., Sereda D. Kinetics formation of aluminized multifunctional coating on steel in SHS condition. Material science and technology. Columbus, Ohio, USA. 2011. – P.1667–1671. (references).
  11. Sereda B. Advanced Chromoaluminizing Coatings for Wear and Heat-resistance on Composite Materials under SHS. / Sereda D., Sereda B. // Material science and technology. Columbus, OH, USA, 2015. – P. 229–232 (references)
  12. Sereda B. Aluminized Multifunctional Coating on Steel in SHS Condition./ Sereda D., Sereda B. //Material science and technology. Pittsburgh. Pennsylvania, USA 2014. – P. 482–486 (references).

*Поступила (received) 03.11.2018*

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

**Серета Борис Петрович (Серета Борис Петрович, Sereda Borys Petrovich)** – научный руководитель научно-исследовательского центра «Материаловедения и инновационных технологий», доктор технических наук, профессор Днепровского государственного технического университета, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9518-381X>; e-mail: [seredabp@ukr.net](mailto:seredabp@ukr.net)

**Кругляк Ирина Васильевна (Кругляк Ирина Васильевна, Kruglyak Irina Vasilievna)** – докторант кафедры «Автомобілі та автомобільне господарство» Днепровского государственного технического университета, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9518-381X>; e-mail: [seredabp@ukr.net](mailto:seredabp@ukr.net)

**Гайдаенко Александр Сергеевич (Гайдаенко Олександр Сергійович, Gaydayenko Alexander Sergeevich)** – аспирант кафедры ААГ Днепровского государственного технического университета, <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=56294233800>; e-mail: [seredabp@ukr.net](mailto:seredabp@ukr.net)

**Б.П. СЕРЕДА, И.В. ПАЛЕХОВА**

### **ИННОВАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ УПРОЧНЕНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ЛЕГИРОВАННЫМИ ТИТАНОВЫМИ ПОКРЫТИЯМИ**

Рассмотрена газотранспортная СВС-технология формирования легированных титановых покрытий в режиме теплового самовоспламенения на конструкционных материалах и сплавах. Исследованы закономерности и механизмы формирования защитных слоев. Установлена зависимость толщины покрытий от технологических параметров процесса. С использованием методов математического моделирования разработаны оптимальные составы СВС-шхт для нанесения комплексных покрытий. Изучено влияние составов СВС-шхт на свойства полученных покрытий. С целью анализа процесса формирования комплексных легированных покрытий на основе титана в условиях СВС выполнен расчет равновесного состояния продуктов реакций в многокомпонентных порошковых системах. Предложена кинетическая схема химических превращений. Представлены результаты микроскопического и рентгеноструктурного анализов фазового состава полученных покрытий. Рассмотрено влияние поверхностного СВС–упрочнения материалов на эксплуатационные характеристики материалов.

**Ключевые слова:** химические газотранспортные реакции, самораспространяющийся высокотемпературный синтез, покрытие, тепловое самовоспламенение, математическое моделирование, коррозионная стойкость, диффузия, плотность, пористость, микротвердость.

**Б.П. СЕРЕДА, І.В. ПАЛЕХОВА**

### **ИННОВАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ЗМІЦНЕННЯ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ЛЕГОВАНИМИ ТИТАНОВИМИ ПОКРИТТЯМИ**

Розглянуто газотранспортна СВС-технологія формування легованих титанових покриттів в режимі теплового самозаймання на конструкційних матеріалах і сплавах. Досліджено закономірності та механізми формування захисних шарів. Установлено залежність товщини покриттів від технологічних параметрів процесу. З використанням методів математичного моделювання розроблено оптимальні склади СВС-шхт для нанесення комплексних покриттів. Вивчено вплив складів СВС-шхт на властивості отриманих покриттів. З метою аналізу процесу формування комплексних легованих покриттів на основі титану в умовах СВС виконаний розрахунок рівноважного стану продуктів реакцій в багатокомпонентних порошкових системах. Запропоновано кінетичну схему хімічних перетворення. Представлені результати мікроскопічного та рентгеноструктурного аналізів фазового складу отриманих покриттів. Розглянуто вплив поверхневого СВС зміцнення матеріалів на експлуатаційні характеристики матеріалів.

**Ключові слова:** хімічні газотранспортні реакції, саморозповсюджувальний високотемпературний синтез, покриття, теплове самозаймання, математичне моделювання, корозійна стійкість, дифузія, щільність, пористість, микротвердість.

**B.P. SEREDA, I.V. PALEKHOVA**

### **INNOVATIVE TECHNOLOGY OF STRENGTHENING OF CONSTRUCTION MATERIALS WITH ALLOYED TITANIUM COATINGS**

The gas transport SHS–technology for the formation of doped titanium coatings in the thermal self-ignition mode on structural materials and alloys is considered. The laws and mechanisms of the formation of protective layers are investigated. The dependence of the coating thickness on the technological parameters of the process is established. Using the methods of mathematical modeling, the optimal compositions of SHS-mixtures for the application of complex coatings have been developed. The influence of the composition of SHS-mixture on the properties of the coatings obtained was studied. In order to analyze the process of forming complex doped coatings based on titanium under SHS conditions, the equilibrium state of the reaction products in multicomponent powder systems was calculated. A kinetic scheme of chemical transformations is proposed. The results of microscopic and X-ray analysis of the phase composition of the obtained coatings are presented. The influence of the surface SHS hardening of materials on the performance characteristics of materials is considered.

**Keywords:** chemical gas-transport reactions, self-propagating high-temperature synthesis, coating, thermal self-ignition, mathematical modeling, corrosion resistance, diffusion, density, porosity, microhardness.

**Введение.** С повышением требований к надежности оборудования и сроку его эксплуатации большую актуальность приобретают детали из жаростойких, коррозионностойких и износостойких конструкционных материалов. В машиностроении значительную часть себестоимости продукции формируют затраты на ремонт оборудования, узлов и агрегатов ответственного назначения. Решение этих задач тесно связано с упрочнением поверхности изделий.

Для повышения надежности техники, снижения себестоимости ее обслуживания, увеличения ресурса эксплуатации широкое применение получили покрытия на основе титана. Поскольку в сложных условиях эксплуатации однокомпонентные титановые покрытия не способны обеспечить необходимые рабочие свойства изделий, то целесообразно насыщение поверхности металлов несколькими элементами. Совместное насыщение сталей Ti, Cr и Si

позволяет повышать твердость поверхностного слоя, жаростойкость и коррозионную стойкость изделий, а также увеличить толщину наносимых покрытий и ускорить процесс их формирования [1-6].

В данной работе рассмотрена технология химико-термической обработки сталей в условиях самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС), совмещенная с химическими газотранспортными реакциями [7-11]. СВС представляет собой высокоинтенсивное экзотермическое взаимодействие химических элементов в конденсированной фазе, способное к самопроизвольному распространению в виде волны горения.

Такой синтез материалов значительно отличается от стандартных методов порошковой металлургии, основанных на спекании химически инертных соединений и обладает рядом преимуществ: формирование активных химических и термических

зон, что позволяет интенсифицировать превращения реагентов и приводит к образованию нужных продуктов; использование менее дорогой химической энергии (тепловыделение при экзотермических реакциях) вместо электрической для достижения высоких температур, требуемых при получении продуктов; использование относительно простого оборудования (вместо печей и других нагревательных устройств); использование в процессе быстрого послойного нагрева больших объемов реагентов вместо медленного прогрева через стенки от внешних источников теплоты.

Процессы обработки могут осуществляться в режиме горения или теплового самовоспламенения и характеризуются интенсивным нанесением покрытий благодаря наличию градиента температур в системе изделие – порошковая среда.

**Целью данной работы** являлась разработка составов порошковых СВС– смесей для нанесения многокомпонентных покрытий на основе титана в режиме теплового самовоспламенения, исследование физико-химических процессов формирования покрытий, определение оптимальных технологических параметров СВС-процесса при комплексном насыщении, изучение их влияния на кинетику роста слоев и оценка их качества.

**Материалы исследований.** Химико-термическая обработка углеродистых сталей проводилась в реакторе открытого типа в рабочем интервале температур 950-1200° С при продолжительности изотермической выдержки 30-60 мин. В качестве насыщающих сред применяли смеси порошков оксидов хрома и алюминия, титана, кремния, алюминия и металлического йода (газотранспортного агента) дисперсностью 200-350 мкм.

Подготовка поверхности образцов включала последовательные стадии шлифовки, полировки и обезжиривания в ацетоне. Инициирование процесса насыщения осуществляли путем предварительного нагрева в печи сопротивления до температуры начала самовоспламенения (скорость нагрева – 0,5°С/с). Температуры СВС-смеси контролировали хромель-алюмелевой термопарой в защитном чехле, введенной непосредственно в объем шихты, и подключенной к потенциометру серии КСП.

Толщину упрочненных слоев исследовали на световом микроскопе "Neophot-21" при увеличении  $\times 150$ ,  $\times 250$ . Микроструктуру выявляли методом травления в 3% спиртовом растворе пикриновой кислоты (ТУ 6-09-08-317-80). Для выявления границ зерен феррита использовали 4% спиртовый раствор азотной кислоты [12].

Исследование элементного состава проводили методом микрорентгеноспектрального анализа с применением микроанализатора JEOL "Superprob-733". Локальность анализа 1 мкм<sup>2</sup>, глубина анализа ~ 1 мкм. Микротвердость покрытий определяли на приборе ПМТ-3. Коррозионную стойкость образцов с покрытиями оценивали в 10-% растворе H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> при температуре 20°С. Для расчета равновесного состава

продуктов системы был использованы прикладные пакеты программ "АСТРА.4", TERRA и Recalc [13].

При разработке составов порошковых реакционных СВС-смесей, обеспечивающих высокую коррозионную стойкость, использовали методы математического планирования эксперимента с реализацией полного факторного анализа по плану 2<sup>3</sup> и дробного факторного эксперимента 2<sup>4-1</sup>.

Выбор оптимального состава смеси для проведения СВС – процессов в условиях теплового самовоспламенения проводили на основании результатов исследований тепловой картины СВС процесса и физико-механических свойств защитных покрытий (в качестве функций отклика была выбрана коррозионная стойкость покрытий).

Параметры оптимизации:

Y<sub>1</sub> – показатели коррозионной стойкости, τ<sub>исп.</sub> – 75ч, для системы Ti-Cr-Si;

В качестве независимых переменных были выбраны: содержание в СВС-смеси хромистой составляющей, титана, кремния. В качестве исходного материала была выбрана сталь 45. Активатором процесса является J<sub>2</sub> в количестве 1-5% масс. для всех систем.

Для получения стопроцентного состава порошковых СВС-смесей в качестве конечного продукта использовался Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Результатом эксперимента должна стать математическая зависимость между исследуемыми характеристиками в виде функциональной связи  $y=f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_m)$ .

В результате регрессивного анализа, были получены ряд уравнений, показывающие зависимость коррозионной стойкости защитных покрытий от режима теплового самовоспламенения и содержания легирующих элементов.

Результаты расчетов были сопоставлены с экспериментальными исследованиями.

**Результаты исследований и их обсуждение.** Анализ реакций, происходящих при тепловом самовоспламенении СВС-шихт, результатов металлографических исследований фазового состава слоев позволил определить схему образования покрытий. Процесс условно можно разделить на несколько стадий [14]:

1. инертный прогрев реакционной смеси до температуры воспламенения;
2. тепловое самовоспламенение;
3. прогрев изделий;
4. изотермическая выдержка;
5. охлаждение.

Получение покрытий в условиях самораспространяющегося высокотемпературного синтеза происходит при нестационарных условиях, когда ни тепловое, ни химическое равновесие до полного завершения процесса и остывания продуктов является невозможным. Скорости протекания химических процессов определяются кинетическими закономерностями, зависящими от температуры и диффузионных факторов. Если предположить, что на стадии прогрева торможение

диффузионных процессов в газовой фазе невелико, а скорость изменения температуры мала по сравнению со скоростью протекания газофазных химических реакций, то можно считать, что каждому температурному значению соответствует равновесный состав продуктов. Рассчитывая равновесный состав продуктов реакций для ряда конкретных температур из диапазона ее изменения, можно проследить за развитием процесса СВС и предположить механизм образования покрытий.

Термодинамическая модель процесса сводится к следующему: исходная смесь состоит из  $M$  веществ, содержащих  $l$  химических элементов. При фиксированных значениях объема и температуры из этих элементов в результате химических реакций могут образоваться  $m_k$  веществ, присутствующих в  $k = 0, 1 \dots q$  различных фазах. Набор веществ включает  $l$  атомарных и  $(m-l)$  молекулярных компонентов, реакции которых представлены в форме уравнений диссоциации. Математическая формулировка задачи сводится к минимизации термодинамического потенциала.

Исследования показывают, что в диапазоне температур 300-1800 К основными соединениями в газовой фазе являются йодиды  $TiI_4$ ,  $Al_2I_6$ ,  $AlI_3$ ,  $AlI_2$ ,  $AlI$ ,  $SiI_4$ ,  $SiI_3$ ,  $SiI_2$ ,  $SiI$ ,  $CrI_2$ ,  $CrI$ ,  $CrI_3$  (преобладают йодиды  $Ti$  и  $Al$ ), а также йод в атомарном и молекулярном виде.

Стадия инертного прогрева реакционной смеси до температуры воспламенения сопровождается испарением и распадом газотранспортных носителей до атомарного состояния по реакции



В интервале температур 300-1800 К концентрация газообразных  $I_2$  и  $I$  непрерывно возрастает.

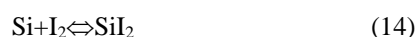
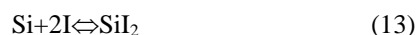
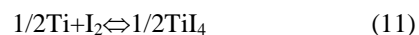
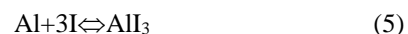
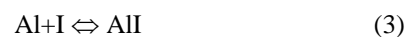
На стадии теплового самовоспламенения протекает экзотермическая реакция восстановления оксида хрома



Температура в реакторе резко повышается до максимальной температуры процесса  $t_m$ . Происходит образование газообразных соединений и перенос основных насыщающих элементов к подложке по реакции  $M + m/n G_n \Leftrightarrow MG_m$ , где  $M$  – наносимый элемент,  $G_n$  – галоген,  $MG_m$  – летучий галогенид.

При этом необходимо, чтобы транспортируемый элемент и подложка находились в разных температурных зонах. На стадии теплового самовоспламенения происходит образованием газообразных йодидов  $Ti$ ,  $Al$ ,  $Si$  и их химический транспорт к поверхности изделий.

Термодинамический анализ равновесного состава продуктов системы свидетельствует, что в исследуемом диапазоне температур насыщающие элементы реакционной смеси взаимодействуют с йодом как в атомарном, так и в молекулярном состоянии, однако более вероятны реакции взаимодействия элементов с атомарным йодом:



Результаты количественного анализа газообразных продуктов взаимодействия элементов с йодом при максимальной температуре процесса зафиксировали наличие 37,78%  $Al_2I_6$ ; 23,06%  $TiI_4$ ; 5,56%  $AlI_2$ ; 33,06%  $AlI_3$  и 0,54% не прореагировавшего остатка.

В области температур 900-1500 К возрастает доля конденсированного алюминия, достигая максимума при 1422 К при одновременном резком снижении концентрации конденсированного  $Al_2O_3$ . Это дает основание предполагать, что происходит реакция термического разложения.

На стадии прогрева изделий происходит выравнивание температуры по объему реактора и формирование диффузионно-активных атомов элементов. При внесении в порошковую систему стальных изделий на их поверхности возможно протекание гетерогенных реакций обмена с железом подложки.

На стадии изотермической выдержки происходит диффузионный рост покрытия, температура в реакторе не изменяется.

На стадии охлаждения формирование слоев происходит менее интенсивно, что связано с уменьшением коэффициентов диффузии насыщающих элементов. При этом большое влияние на качество покрытия имеет скорость охлаждения.

Эффективность обработки определяется временными параметрами процесса обработки и теплофизическими характеристиками шихты.

Экспериментально установлено, что при повышении температуры насыщения и увеличении длительности изотермической выдержки происходит рост толщины диффузионного слоя (рис. 1, 2).

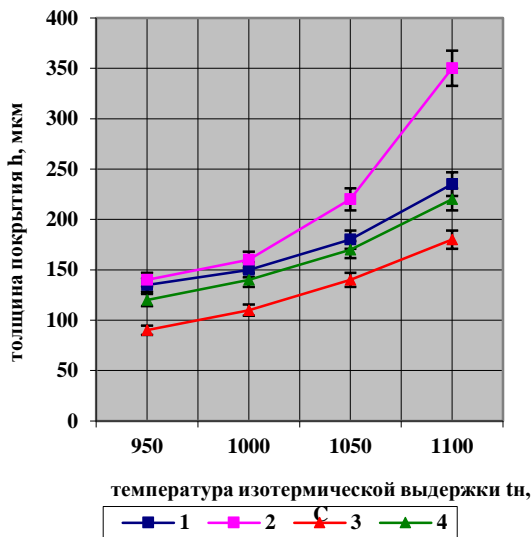


Рис. 1 – Влияние температуры изотермической выдержки на толщину титано-хромосилицированных слоев, полученных на технически чистом железе (2), стали 20 (1), стали 45 (4), У8 (3) в режиме теплового самовоспламенения. Продолжительность изотермической выдержки  $\tau_{\text{в}}=60$  мин

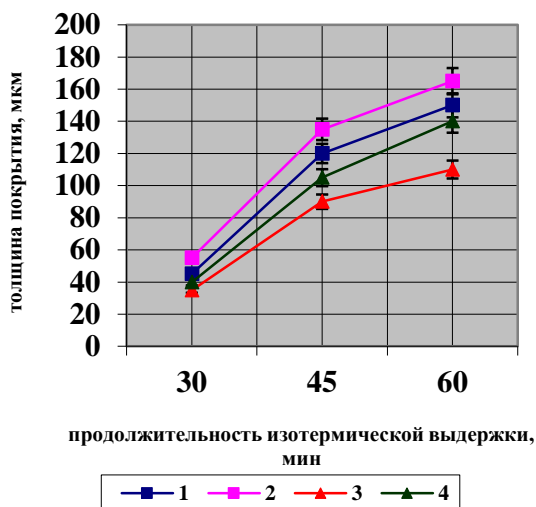


Рис. 2 – Влияние продолжительности изотермической выдержки на толщину титано-хромосилицированных слоев, полученных на технически чистом железе (2), стали 20 (1), стали 45 (4), У8 (3) в режиме теплового самовоспламенения при температуре насыщения  $t_n=1000$  °C

Покрyтия, получаемые в СВС-процессах состоят из продуктов взаимодействия СВС-шихты в поверхностном слое и широкой градиентной диффузионной зоны, вследствие чего обладают улучшенными характеристиками по сравнению с диффузионными аналогами, а также характеризуются высокой адгезионной прочностью. Установлено, что на поверхности сталей формируется зона сложного

силицида  $(\text{Ti}, \text{Fe})_5\text{Si}_3$ , ниже расположены зоны алюминидов  $\text{Fe}_2\text{Al}_5$ ,  $\text{FeAl}$ ,  $\text{Fe}_3\text{Al}$ , легированных Ti, Cr и Si, под ней расположена зона  $\alpha$ -твердого раствора титана, кремния, хрома, алюминия в железе с включением избыточной фазы  $\text{Ti}_5\text{Si}_3$  (рис.3).

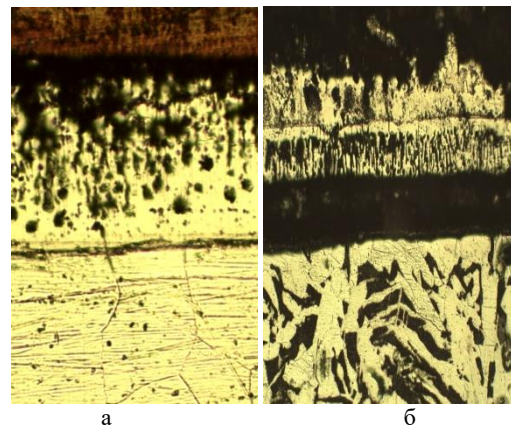


Рис. 3 – Микроструктуры многокомпонентных титано-хромосилицированных покрытий, полученных в режиме теплового самовоспламенения СВС – систем: а – на технически чистом железе; б – на стали 45,  $\times 250$

При диффузии некарбидообразующих элементов в  $\gamma$ -железе после достижения предела растворимости происходит  $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращение. В  $\alpha$ -железе растворимость углерода незначительна, поэтому он оттесняется вглубь подложки с формированием зоны с повышенным содержанием углерода под покрытием. При повышении содержания в шихте алюминия и кремния толщина покрытия растет, однако для достижения высоких концентраций всех насыщающих элементов в покрытии, содержание Si и Al в шихте рекомендовано ограничить до 10% мас. Плотность, пористость и шероховатость покрытий зависит от содержания Si в смеси, при содержании Si  $\sim 10\%$  масс. поры имеют преимущественно округлую замкнутую форму. При увеличении концентрации кремния в шихту шероховатость покрытий увеличивается, высота микронеровностей достигает 15-20 мкм. Плотность сформированных покрытий составляет 2,8-3,1 г/см<sup>3</sup>. При увеличении концентрации кремния в смеси от 5 до 10% (масс.) общая пористость покрытия растет, при этом изменяется и конфигурация пор. Фазовый состав покрытий: Ti-Cr:  $(\text{Cr}, \text{Fe})_{23}\text{C}_6$ ,  $(\text{Cr}, \text{Fe})_7\text{C}_3$ ,  $(\text{Ti}, \text{Cr})\text{C}$ ,  $\text{Cr}_3\text{C}_2$ ,  $\text{Cr}_2\text{Ti}$ ,  $\text{Fe}_2\text{Ti}$ , Ti-Si:  $(\text{Ti}, \text{Fe})_5\text{Si}_3$ ,  $\text{Ti}_5\text{Si}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{Ti}$ ,  $\text{TiSi}_2$ ,  $\text{TiSi}$ ,  $(\text{Fe}, \text{Cr})_3\text{Si}$ , Ti-Al:  $\text{Fe}_2\text{Al}_5$ ,  $\text{FeAl}$ ,  $\text{Fe}_3\text{Al}$ ,  $\text{Ti}_3\text{Al}$ ,  $\text{TiAl}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{Ti}$ , TiAl, Ti-B:  $\text{Fe}_3\text{C}$ ,  $\text{Fe}_3\text{B}$ ,  $\text{FeB}$ ,  $\text{Fe}_2\text{B}$ ,  $(\text{Fe}, \text{Cr}, \text{Al})\text{B}$ ,  $(\text{Fe}, \text{Cr}, \text{Al})_2\text{B}$ ,  $(\text{Fe}, \text{Cr}, \text{Al})\text{Ti}_2$ ,  $\text{TiB}_2$ ,  $\text{TiC}$ ,  $\text{Cr}_2\text{B}$ .

Разработанные составы СВС-смесей были опробованы для упрочнения валков прокатных станов. При исследовании защитных слоев на приборе ПМТ-3 установлено, что микротвердость  $\alpha$ -твердого раствора составляет 350–200 HV, микротвердость сложного силицида на поверхности сталей составляет 1100–1000 HV.

**Выводы.** Проведенные испытания СВС-покрытий на коррозионную стойкость показали



повышение этого показателя в 1,7–1,9 раз по сравнению с диффузионными покрытиями, полученными в изотермических условиях.

#### Список литературы

1. Химико-термическая обработка металлов и сплавов: Справочник / под ред. Ляховича Л. С. – М.: Металлургия, 1981. – 424 с.
2. Ворошин Л. Г. Антикоррозионные диффузионные покрытия – Минск: Наука и техника, 1981 – 296 с.
3. Лахтин Ю. М., Арзамасов Б. Н. Химико-термическая обработка металлов. Учебное пособие для вузов. – М.: Металлургия, 1985. – 256 с.
4. Середя Б. П. Поверхневе зміцнення матеріалів: Монографія / Середя Б. П., Калініна Н. С., Кругляк І. В. – Запоріжжя: РВВ ЗДІА, – 2004. – 230 с.
5. Середя Б. П. Металознавство та термічна обробка чорних та кольорових металів. Підручник. – Запоріжжя: Вид-во ЗДІА, 2008. – 302 с.
6. Филоненко Б. А. Комплексные диффузионные покрытия. М.: Машиностроение. 1981 – 137 с.
7. Мерджанов А. Г. Процессы горения и синтез материалов. – Черноголовка: ИСМАН, 1998. – 512 с.
8. Коган Я. Д., Середя Б. П., Штессель Э. А. Высокоинтенсивный способ получения покрытий в условиях СВЧ / Металловедение и термическая обработка металлов, 1991, №6. – с. 39–40
9. Бейгул О. О. Отримання зносостійких покриттів на автомобільних деталях при нестационарних температурних умовах / Бейгул О. О., Адамчук С. І., Середя Д. Б., Шульга А. С. // Збірник наукових праць ДДТУ, Кам'янське. – 2017. – Випуск 1(30). – С. 77–80.
10. Sereda B., Sereda D. Obtaining of Boride Coatings under SHS Conditions for Car Parts. Material science and technology– 2016. Salt Lake City, Utah USA 2016-1339p.-P.945-948.
11. Sereda B., Sereda D. Development of Protective Coatings Formulations Based on Boron for Units Operating at High Temperatures in Metallurgy. Material science and technology 2016. Conference and Exhibition. Salt Lake City, Utah USA 2012-1550p.-P.931–934
12. Беккерт М., Клемм Х. Справочник по металлографическому травлению. – М.: Металлургия, 1979. – 336 с.
13. Синярев Г. Б., Ватолин Н. А., Трусов Б. Г., Моисеев Р. К. Применение ЭВМ для термодинамических расчетов металлургических процессов. – М.: Наука, 1982. – 263с.
14. Середя Б. П., Палехова И. В., Белокопю Ю. А., Середя Д. Б. Получение интерметаллидных соединений и покрытий при нестационарных температурных условиях. Новые материалы и технологии в металлургии и машиностроении: Научный журнал № 2, 2014. ЗНТУ, Запоріжжя, С.67-71

#### References (transliterated)

1. Himiko-termicheskaja obrabotka metallov i splavov: Spravochnik / pod red. Ljahovicha L. S.– Moscow: Metallurgija, 1981. – 424 p. (in Russian).
2. Voroshnin L. G. Antikorrozionnye diffuzionnye pokrytija – Minsk: Nauka i tehnika, 1981 – 296 p. (in Russian).
3. Lahtin Ju. M., Arzamasov B. N. Himiko-termicheskaja obrabotka metallov. Uchebnoe posobie dlja vuzov. – Moscow: Metallurgija, 1985. – 256 p. (in Russian).
4. Sereda B. P. Poverhneve zmecnennja materialiv: Monografija / Sereda B. P., Kalinina N. S., Krugljak I. V. – Zaporizhzhja: RVV ZDIA, – 2004. – 230 p. (in Russian).
5. Sereda B. P. Metaloznavstvo ta termichna obrobka chornih ta kol'orovih metaliv. Pidruchnik. – Zaporizhzhja: Vid-vo ZDIA, 2008. – 302 p. (in Russian).
6. Filonenko B. A. Kompleksnye diffuzionnye pokrytija. Moscow: Mashinostroenie. 1981 – 137 p. (in Russian).
7. Merzhanov A. G. Processy gorenija i sintez materialov. – Chernogolovka: ISMAN, 1998. – 512 p. (in Russian).
8. Kogan Ja. D., Sereda B. P., Shtessel' Je. A. Vysokointensivnyj sposob poluchenija pokrytij v uslovijah SVS / Metallovedenie i termicheskaja obrabotka metallov, 1991, No 6. – pp.39–40 (in Russian).
9. Bejgul O. O. Otrimannja znosostijkih pokrittiv na avtomobil'nih detaljah pri nestacionarnih temperaturnih umovah / Bejgul O. O., Adamchuk S. I., Sereda D. B., Shul'ga A. S. // Zbirk naukovih prac' DDTU, Kam'jans'ke. – 2017. – No 1(30). – pp. 77–80 (in Russian).
10. Sereda B., Sereda D. Obtaining of Boride Coatings under ShS Conditions for Car Parts. Material science and technology– 2016. Salt Lake City, Utah USA 2016-1339p.-PP.945-948 (references)
11. Sereda B., Sereda D. Development of Protective Coatings Formulations Based on Boron for Units Operating at High Temperatures in Metallurgy. Material science and technology 2016. Conference and Exhibition. Salt Lake City, Utah USA 2012-1550 p.-PP. 931–934 (references)
12. [Bekker M., Klemm H. Spravochnik po metallograficheskomu travleniju. – Moscow: Metallurgija, 1979.– 336 p. (in Russian).
13. Sinjarev G. B., Vatoлин N. A., Trusov B. G., Moiseev R. K. Primenenie JeVM dlja termodinamicheskikh raschetov metallurgicheskikh processov. – Moscow: Nauka, 1982. – 263p. (in Russian).
14. Sereda B. P., Palehova I. V., Belokon' Ju. A. , Sereda D. B. Poluchenie intermetallidnyh soedinenij i pokrytij pri nestacionarnyh temperaturnyh uslovijah. Novye materialy i tehnologii v metallurgii i mashinostroenii: Nauchnyj zhurnal No 2, 2014. ZNTU, Zaporozh'e, pp.67–71 (in Russian).

Получена (received) 22.10.2018

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

**Середя Борис Петрович (Середя Борис Петрович, Sereda Borys Petrovich)** – научный руководитель научно-исследовательского центра «Материаловедения и инновационных технологий», доктор технических наук, профессор Днепропетровского государственного технического университета, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9518-381X>; e-mail: seredabp@ukr.net

**Палехова Ирина Владимировна (Палехова Ирина Володимирівна, Palekhova Irina Vladimirovna)** – аспірант кафедри «Автомобілі та автомобільне господарство» Дніпровський державний технічний університет, <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6507380761> , e-mail: seredabp@ukr.net

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

**М. Е. ТАРАНЕНКО****СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КАЧЕСТВА АВТОКУЗОВНЫХ ЛИСТОВЫХ ДЕТАЛЕЙ**

В статье предложена концепция совершенствования качества изготовления крупногабаритных листовых автокузовных деталей на основе минимизации уровня и равномерного распределения по поверхности пластических деформаций указано, что это снижает уровень остаточных упругих напряжений и определяемую им величину коробления (пружинения) детали. Показано, что снижение уровня и более равномерное распределение по поверхности пластических упругих деформаций может быть достигнуто с соблюдением показателей технологичности и импульсным характером нагружения заготовки при штамповке. Оценен диапазон стабильности параметров, определяющих стабильность амплитудно-частотных характеристик нагружающих импульсов.

**Ключевые слова:** коробление листовой детали, технологичность конструкции, электрогидравлический разряд, электрод, импульсы давления, ток и напряжения.

**М. Е. ТАРАНЕНКО****УДОСКОНАЛЕННЯ ЯКОСТІ АВТОКУЗОВНИХ ЛИСТОВИХ ДЕТАЛЕЙ**

В статті пропонується концепція підвищення якості виготовлення великогабаритних листових автокузовних деталей на основі мінімізації рівня та рівномірного розподілу по поверхні пластичних деформацій вказує, що це знижує рівень залишкових еластичних напружень, який визначає величину короблення (пружинення) деталі. Показано, що зниження рівня та більш рівномірний розподіл по поверхні пластичних еластичних деформацій може бути досягнуто за допомогою дотримання показників технологічності та імпульсного характеру завантаження заготовки при штампуванні. Оцінено діапазон стабільності параметрів, що визначають стабільність амплітудно-частотних характеристик навантажувальних імпульсів.

**Ключові слова:** короблення листової деталі, технологічна конструкція, електрогидравлічний розряд, електрод, імпульси тиску, струм та напруга.

**М. Е. TARANENKO****QUALITY PERFECTION OF CAR-BODY SHEET ARTICLES**

In this paper, the author has shown that the reduction of warping (the inevitable technological legacy) contributes to taking into account the peculiarities of the form-changing process. First of all, this includes the need for deformation without localization of deformation in certain parts of the part and the application of deforming efforts with a specific frequency for each material to create plasticity waves in the deformable material. In modern stamping engineering there is a problem of increasing the accuracy of the geometric shapes of sheet metal parts and improving their functional properties by reducing the irregularity of their thickness (thinning). In many ways, this problem is due to the wider use of new strain-hardening sheet materials, the application of the traditional approach to their design, to a small extent taking into account the features of new methods of forming, for example, pulsed (electro-hydraulic, explosive) punching. Improving the quality of automotive body-sized large parts, determined by a decrease in their distortion, can and should be carried out in a complex way: when designing parts, it is necessary to take into account the features of the proposed manufacturing method or, otherwise, adhere to the indicators of the technological effectiveness of the design to a particular manufacturing method; For the manufacture of such parts, it is necessary to choose newer methods that reduce harmful technological heredity through their functionality. In particular, this corresponds to pulse shaping methods. Their consecutive local deformation is proposed. In this case, in a certain central region of the cavity, a local zone is formed with a minimum thinning in its center and a gradual decrease

**Keywords:** warping of sheet article, structural manufacturability, electrohydraulic discharge, electrode, impulses of pressure, current and voltage.

**Введение.** В современном штамповочном машиностроении стоит проблема повышения точности геометрических форм листовых деталей и улучшения их функциональных свойств путем снижения неравномерности их толщин (утонений). Во многом эта проблема обусловлена более широким применением новых деформационно-упрочняющих листовых материалов, применением традиционного подхода к их проектированию, в малой степени учитывающих особенности новых методов формообразования, например, импульсной (электрогидравлической, взрывной) отштамповки.

**Целью работы** является анализ причин возникновения недостатков и предложения путей их устранения.

**Основная часть.** В работе автора [1] показано, что разному снижению коробления (пружинения) – как неизбежного технологического наследия, способствует учет особенностей процесса формоизменения. В первую очередь к этому относится необходимость деформирования без локализации

деформации утонения на отдельных участках детали и приложения деформирующих усилий с определенной для каждого материала частотой для создания в деформируемом материале волн пластичности.

Эффективность учета второй особенности подтверждена на практике. Известны работы В. П. Северденко, например [2], в которой показано, что наложение УЗ-колебаний с частотой 16...20 кГц на деформируемую заготовку при вытяжке приводит к заметному снижению деформирующего усилия, увеличивает возможную степень деформации, уменьшает остаточные напряжения. Такие же эффекты наблюдаются и при волочении с наложением вибрации [3]. При электро-гидравлической (ЭГ)-обработке нагружающие усилия прикладывается в виде пакета волн определенной частоты, положительные эффекты повышения пластичности и релаксации остаточных напряжений проявляется ярко [4, 5, 6]. Но возможности снижения коробления листовых деталей путем уменьшения локализации утонения изучены не полностью.

Рассмотрим несколько типовых конструкций деталей автокузовов современных легковых машин (рис. 1).

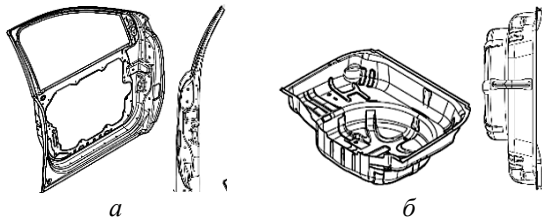


Рис. 1 – Изображения: а – внутренней панели двери; б – участка пола багажника автомобиля)

Это относительно плоские детали, размерами 1200×90 мм с глубокими полостями в центре. Сечения

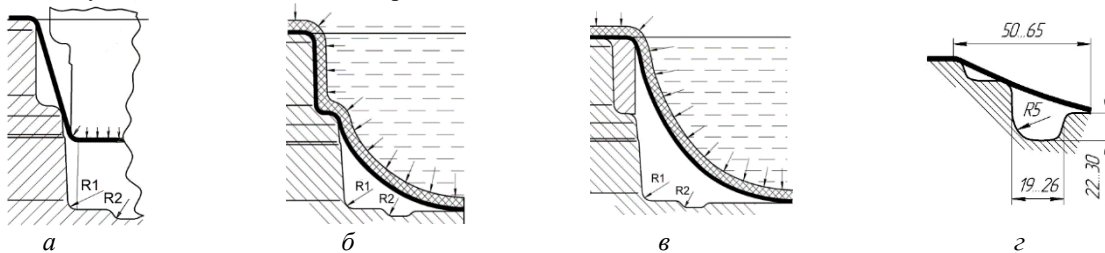


Рис. 2 – Промежуточные положения заготовки детали: а – формирование ступеньки пуансоном в матрице; б – при заполнении донного радиуса; в – при заполнении донного радиуса с использованием дополнительной вставки; г – при формообразовании рифта на фланце

При втягивании заготовки в матрицу пуансоном (рис. 2, а) она соприкасается с матрицей только на участках входного (перетяжного) радиуса матрицы и небольшого участка радиуса ступени борта. Это минимизирует силы трения и позволяет успешно втягивать фланцевые участки заготовки в полость матрицы. Во втором случае (рис 2, б) на всю поверхность заготовки действует высокое давление, заставляющее заготовку прижиматься к матрице по двум радиусам и всей поверхности ступени борта. Это резко увеличивает трение и, в большей мере, препятствует поступлению материала фланцевой части. При достижении заготовкой дна матрицы силами трения блокируется поступление материала из центральной зоны полости. Это приводит к тому, что оформление донного радиуса полости происходит только путем растяжения провисающего участка заготовки, что определяет значительные деформации утонения в районе донного радиуса и повышенные затраты энергии (увеличения давления) для формообразования этого радиуса.

Для устранения их нежелательных явлений предлагается на предварительных этапах формообразования детали устанавливать на ступень борта технологическую вставку (рис. 2, в), на дно полости устанавливать технологическую подкладку (на рис. 2, в не показана), которые удаляются на этапах калибровки детали.

бортов полостей ступенчатое, а фланцевая часть детали имеет сложную форму сечения или ступенчатую подсежку.

Такая форма обусловлена функциональным назначением детали и предполагает ее изготовление с применением пуансона и матрицы. Можно считать, что она технологична для такой системы штамповки.

В современном автокузовном производстве по ряду причин все шире начинают использоваться методы штамповки жидкой или эластичной средой (статические и импульсные). При этом промежуточное положение заготовки относительно оснастки несколько изменяется по сравнению с аналогичным положением традиционного способа (рис. 2).

Таковыми действиями достигается равномерное распределение деформаций утонения вдоль поверхности детали.

Для формообразования больших по размерам полостей детали с более равномерным и, следовательно, меньшими значениями деформаций утонения (без их локализации в центральной области полости). Предлагается их последовательное локальное деформирование. В этом случае, в некоторой центральной области полости формообразуется локальная выштамповка с минимальным утонением в ее центре и плавным уменьшением таких деформаций к периферии

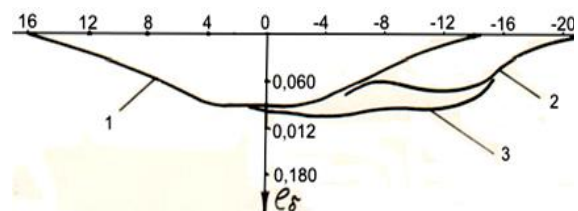


Рис. 3 – Последовательность измерения формы и распределение относительных утонений при трехкратном локальном нагружении листовой заготовки

выштамповки (рис. 3, контур 1). Затем с определенным шагом по радиусу полости формируется последующие выштамповки (рис. 3, контур 2 и 3). При этом разности

утонений в центрах первой и последующих выштамповок.

Между этими двумя выштамповками может образовываться участок поверхности детали с обратной кривизной (нечто похожее на начальную стадию складки). В этом случае последующую выштамповку формируют в зоне учета с обратной кривизной.

Повторяя названную последовательность деформирования формообразуют полость детали с меньшими по величине и равномерными по плоскости утонениями всей центральной полости детали.

Положительные результаты экспериментальной проверки указанной последовательности формообразования разных по форме и назначению деталей приведены в работе [7].

Техническая возможность последовательного локального нагружения обеспечивается применением ЭГ-прессов с пространственно-временным управлением нагружения.

Импульсный временный характер нагружения листовой заготовки на таких прессах задается управлением амплитудно-частотными параметрами как отдельного импульса, так и временем создания параллельных импульсов на соседних разрядных контурах многоэлектродных ЭГ-установок. Необходимость управления амплитудно-частотными характеристиками (АЧХ) силового нагружения диктуется потребностью соблюдения частоты волн деформаций характерных для каждого штампуемого материала. Определение этих частот отдельная задача. Которая может решаться, например, методом, изложенным в работе [8].

Стабильность АЧХ ЭГ-разряда определяется конструкцией разрядной камеры и разрядной частью рабочего электрода, электропроводностью воды, а также рядом характеристик разрядного контура. В рамках научно-исследовательских работ по проекту Р 326 с Украинским научно-техническим центром (УНТЦ) были проведены исследования о влиянии формы разрядной поверхности рабочего электрода на стабильность режимов разрядов. Для этого испытывались разные конструкции законцовок центрального токопроводящего стержня рабочего электрода. Две формы законцовки из испытываемого ряда показаны на рис. 4. Стабильность АЧХ оценивались по следующим параметрам:

- относительной величине падения разрядного тока к разрядному напряжению;
- относительной длительности 1 и 2 разрядного тока;
- относительной длительности предразрядной стадии;
- среднему значению серии (при повторении эксперимента) амплитудного значения, развиваемого на преграде давления;
- среднему значению, передаваемому преграде импульсу давления и ряду других параметров.

Можно отметить, что при увеличении разрядной кромки электрода несколько возрастают потери

энергии на предразрядной стадии (со значений 0,04...0,1 до значения 0,12 после 500 разрядов). Изменения относительных параметров разрядного тока практически не наблюдается (о чем свидетельствуют наложенные осциллограммы тока. Отношение длительностей полупериодов тока практически не наблюдается после 2000 разрядов. Этот параметр в первую очередь характеризует частотные характеристики разряда. Общая длительность сигнала давления около 292 мкс и этот сигнал состоит из 2-3 токов. Т. е. средняя длительность пика давления 90...150 мкс. А эти значения находятся в рамках диапазона периодов релаксации остаточных напряжений для многих марок штампуемых материалов.

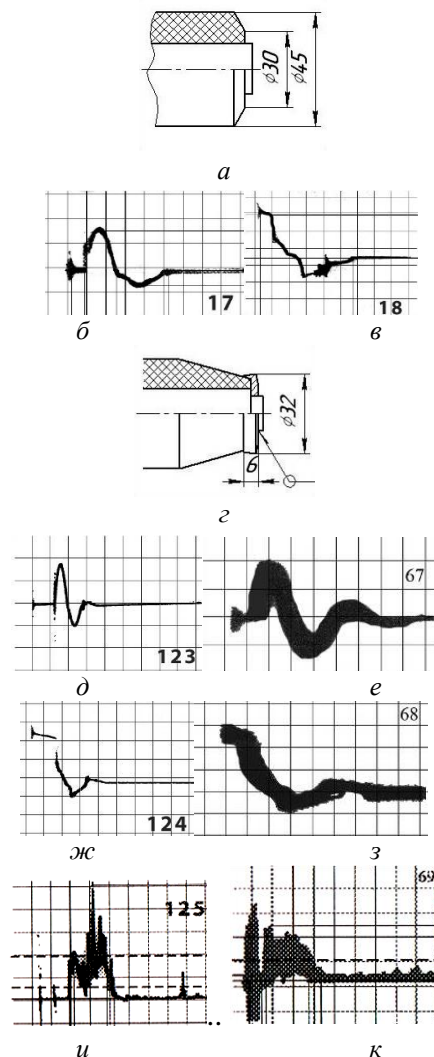


Рис. 4 – Сравнение стабильности режимов разрядов в зависимости от: а, з – формы законцовок; б, д, ж, и – центрального токопроводящего стержня электрода; в, е, з, к – осциллограммы разрядных тока и напряжения при первых разрядах и на этапах эксплуатации (30 разрядов)

Доли нестабильности режимов разряда, обусловленные электрической эрозией разрядных кромок и изменением электрических характеристик воды в течение серий разрядов снижаются путем периодической перезаточки кромок и проведением

ЭГ-разрядов в постоянно сменяемой воде с последующим ее «отдыхом» и повторным использованием.

**Выводы.** Совершенствование качества автокузовных крупногабаритных деталей, определяемое уменьшением их коробления можно и нужно осуществлять комплексно. А именно:

– при проектировании деталей надо учитывать особенности предлагаемого метода изготовления или, иначе, придерживаться показателей технологичности конструкции к тому или иному методу изготовления;

– для изготовления таких деталей надо выбирать более новые методы, которые позволяют уменьшить вредную технологическую наследственность через их функциональные возможности. В частности, этому соответствуют импульсные методы формообразования.

Безусловно, повышение качества деталей требует определенных финансовых затрат, но соответствует общемировой тенденции.

#### Список литературы

1. Тараненко, М. Е. Метод снижения коробления листоштампованных деталей [Текст] / М. Е. Тараненко // Обработка материалов давлением : сб. науч. трудов, – Краматорск : ДГМА, № 1 (46), 2018. – С. 100–104.
2. Северденко, В. П. Листовая штамповка с ультразвуком [Текст] / В. П. Северденко, В. С. Пашенко, Б. С. Кособуцкий // – Минск : Наука и техника, 1975, – 192 с.
3. Дидык, Р. П. Анализ влияния динамики нагружения на деформационное поведение металлов и их сплавов в пластической области [Текст] / Р. П. Дидык, Е. В. Кузнецов // Доклады НАН Украины, 2008, № 1, – С. 49–55.
4. Мериин, Б. В. Эффективность электрогидравлической правки нежёстких деталей при разных условиях нагружения [Текст] / Б. В. Мериин, И. Ф. Корнет, Д. Е. Савулькин // КШП, 1990, № 10, – С. 13–15.
5. Старков, Н. В. Экспериментальное исследование пластичности конструкционных алюминиевых сплавов при импульсном гидравлическом нагружении [Текст] / Н. В. Старков, В. М. Косенков, Д. Р. Аврамец // КШП . Обработка металлов давлением, 2008, № 5, – С. 3–7.
6. Тараненко, М. Е. Изготовление высокоточных зеркал систем космической связи [Текст] / М. Е. Тараненко // КШП, 1998, № 11, – С. 33 – 35.
7. Тараненко, М. Е. Электрогидравлическая штамповка: теория, оборудование, техпроцессы : монография : в 2 ч. [Текст] / М. Е. Тараненко. – Х. : Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», 2011. – 273 с.
8. Косенков, В. М. Метод определения реологических и энергетических характеристик ударного сжатия металлов [Текст] / В. М. Косенков, В. М. Бычков // ПМТФ, 2012, Т53, № 6, – С. 134–143.

#### References (transliterated)

1. Taranenko, M. E. Metod snyzhenyya koroblenyya lystoshtampovannykh detalej [Method of warping reduction of sheet metal forming articles] // Obrabotka materyalov davlenym : sb. nauch. trudov, – Kramatorsk. Publ., 2018, No. 1 (46). – pp. 100–104.
2. Severdenko, V. P., Pashhenko, V. S., Kosobuczkyj, B. S. Lystovaya shtampovka s ultrazvukom [Sheet metal forming by ultrasound]. – Mynsk. Publ., 1975. 192 p.
3. Dydyk, R. P., Kuznecov, E. V. Analiz vlyyanyya dynamyky nagruzhenyya na deformacyonnoe povedenye metallov y ux spлавov v plastycheskoj oblasti [Analysis of loading dynamics influence on deformable behavior of metals and their alloys in plasticity region] // Doklady NAN Ukrainy. Publ., 2008, No. 1, – pp. 49–55.
4. Meryyn, B. V., Kornet, Y. F., Savulkyn, D. E. Effektyvnost elektrogydravlycheskoj pravky nezhystrykh detalej pry raznykh uslovyiyax nagruzhenyya [Efficiency of electro-hydraulic correction of low-rigidity articles at variable loading conditions]. – Moscow. Publ., No. 10, – pp. 13–15.
5. Starkov, N. V., Kosenkov, V. M., Avramecz, D. R. Eksperymentalnoe yssledovanye plastychnosti konstrukcyonnykh alumynyevykh spлавov pry ymпульсном gydravlycheskom nagruzhenyy [Experimental studies of structural aluminum alloys plasticity at impulse hydraulic loading]. Moscow. Publ. KShP, Obrabotka metallov davlenym, 2008, No. 5, pp. 3–7.
6. Taranenko, M. E. Yzgotovlenye vysokotochnykh zerkal system kosmycheskoj svyazy [Manufacturing of high-precision mirrors of space communication]. Moscow. Publ., KShP, 1998, No. 11, pp. 33–35.
7. Taranenko, M. E. Elektrogydravlycheskaya shtampovka: teoryya, oborudovanye, texprocessy : [Electrohydraulic forming: theory, equipment, manufacturing processes] / M. E. Taranenko. Kharkiv. Publ., National Aerospace University “KhAI”, 2011. 273 p.
8. Kosenkov, V. M., Bychkov, V. M. Metod opredelenyya reologicheskyyh y energetycheskyyh kharakterystyk udarnogo szhatyya metallov [Method of determination of rheological and energy characteristics of impact metal compression]. PMTF, 2012, No. 53, Vol. 6, pp. 134–143.

Получена (received) 14.11.2018

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

**Тараненко Михайл Євгеньевич (Тараненко Михайло Євгенович, Mykhaylo Taranenko)** – доктор технічних наук, професор, Національний аерокосмічний університет ім. Н. Е. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», г. Харків, тел.: (057) 788-41-70, e-mail: m.taranenko@khai.edu

*Е. А. ФРОЛОВ, С. Г. ЯСЬКО, В. В. АГАРКОВ, С. И. КРАВЧЕНКО*

### **СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РАЗДЕЛЕНИЯ ЛИСТОВОГО МАТЕРИАЛА ЭЛАСТИЧНОЙ СРЕДОЙ**

Показаны пути совершенствования вырезки деталей эластичной средой, способствующие повышению геометрической точности среза. Проведенные теоретические и экспериментальные исследования процесса разделения листового металла эластичной средой позволили установить пути совершенствования вырубki, пробивки. Определено, что в зависимости от допустимой деформации сдвига материала заготовки возможны два механизма разрушения, приводящие к неодинаковой форме среза полученной детали. В процессе разделения листовой заготовки эластичной средой реализуются следующие этапы: изгиб заготовки около острой кромки шаблона, сдвиг разделяемых частей и изгиб припуска с растяжением вплоть до их разделения. Улучшение геометрической точности поверхности среза при толщине заготовки более 1 мм реализуется в схемах с локализацией очага пластической деформации и управления траекторией трещины разрушения, отделения припуска при небольших углах его изгиба и изменения схемы нагружения разделяемого припуска, а также за счет повышения упругости эластичной среды. Без усложнения оснастки, локализацию очага пластической деформации можно обеспечить при последовательном отделении припуска. Такой характер разделения создается конструктивными элементами штампов, обеспечивающими последовательное увеличение давления эластичной среды вдоль контура среза. Локализация давления обеспечивает разделение припуска сначала в одной зоне контура детали, а затем и в остальных. При этом за счет меньшего угла изгиба припуска к моменту образования трещины снижается утонение заготовки в зоне разделения. В пневмоударной установке модели ТА-1324 это реализуется за счет эластичного блока имеющего переменную толщину. В предлагаемом методе разделения деталей сложных контуров это достигается путем изменения высоты шаблона в пределах от 1,5 до 3-3,5 толщин заготовки, тогда трещина разрушения появляется при меньших углах изгиба припуска и тем самым обеспечивается разделение при меньшем утонении заготовки в зоне разделения. Предложенные пути совершенствования пневмоударной штамповки обеспечивают вырубку, пробивку деталей из листовых медных, алюминиевых сплавов толщиной 0,3..10 мм и малоуглеродистой стали толщиной до 2 мм. Достижимая шероховатость поверхности среза на деталях составляет  $Ra=0,3...0,6$  мкм, а в случае высокопрочных материалов толщиной до 4...5 мм с шероховатостью поверхности среза  $Ra=0,6...1,0$  мкм.

**Ключевые слова:** пробивка, вырубка, тонкий, лист, пневмоударная, штамповка, эластичная, среда, полиуретан.

*Є. А. ФРОЛОВ, С. Г. ЯСЬКО, В. В. АГАРКОВ, С. І. КРАВЧЕНКО*

### **ВДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСІВ РОЗДІЛЕННЯ ЛИСТОВОГО МАТЕРІАЛУ ЕЛАСТИЧНИМ СЕРЕДОВИЩЕМ**

Показано шляхи вдосконалення вирізання деталей еластичним середовищем, що сприяє підвищенню геометричної точності зрізу. Проведені теоретичні та експериментальні дослідження процесу розділення листового металу еластичним середовищем дозволили встановити шляхи вдосконалення операцій вирівнювання та пробивання. Визначено, що в залежності від допустимої деформації зсуву матеріалу заготовки можливі два механізми руйнування, які призводять до неоднакової форми зрізу отриманої деталі. У процесі розділення листової заготовки еластичним середовищем реалізуються наступні етапи: вигин заготовки коло гострої кромки шаблону, зрушення частин, що розділяються і вигин припуску з розтяганням аж до їх розділу. Поліпшення геометричної точності поверхні зрізу при товщині заготовки більше 1 мм реалізується в схемах з локалізацією осередку пластичної деформації та управління траєкторією тріщини руйнування, відділення припуску при невеликих кутах його вигину і зміни схеми навантаження припуску, що розділяється, а також за рахунок підвищення пружності еластичного середовища. Без ускладнення оснащення, локалізацію осередку пластичної деформації можна забезпечити при послідовному відділенні припуску. Такий характер поділу створюється конструктивними елементами штамів, що забезпечують послідовне збільшення тиску еластичного середовища уздовж контуру зрізу. Локалізація тиску забезпечує поділ припуску спочатку в одній зоні контуру деталі, а згодом і в інших. При цьому за рахунок меншого кута вигину припуску до моменту утворення тріщини знижується потоншення заготовки в зоні поділу. У пневмоударній установці моделі ТА-1324 це реалізується за рахунок еластичного блоку, що має змінну товщину. У запропонованому методі поділу деталей складних контурів це досягається шляхом зміни висоти шаблону в межах від 1,5 до 3-3,5 товщини заготовки, тоді тріщина руйнування з'являється при менших кутах вигину припуску і тим самим забезпечується поділ при меншому потонненні заготовки в зоні поділу. Запропоновані шляхи вдосконалення пневмоударного штампування забезпечують вирівнювання і пробивання деталей з листових мідних, алюмінієвих сплавів товщиною 0,3..10 мм та маловуглецевої сталі товщиною до 2 мм. Шорсткість поверхні зрізу, що досягається, на деталях складає  $Ra=0,3...0,6$  мкм, а в разі високоміцних матеріалів товщиною до 4...5 мм з шорсткістю поверхні зрізу  $Ra=0,6...1,0$  мкм.

**Ключові слова:** пробивання, вирівнювання, тонкий, лист, пневмоударне, штампування, еластичне, середовище, поліуретан.

*Ye. FROLOV, S. YASKO, V. AGARKOV, S. KRAVCHENKO*

### **PERFECTION OF THE PROCESSES OF SEPARATION OF SHEET MATERIAL BY ELASTIC MEDIUM**

The ways to improve the cutting of parts by an elastic medium are shown, contributing to an increase in the geometric accuracy of the cut. Theoretical and experimental studies of the process of sheet metal separation by an elastic medium made it possible to establish ways to improve cutting, punching. It was determined that, depending on the allowable shear deformation of the workpiece material, two mechanisms of destruction are possible, leading to an unequal cut shape of the obtained part. In the process of separating a sheet blank with an elastic medium, the following steps are implemented: bending the blank near the sharp edge of the template, shifting the parts to be divided and bending the allowance with stretching until they separate. Improving the geometric accuracy of the cut surface when the workpiece thickness is more than 1 mm is implemented in schemes with localization of the center of plastic deformation and control of the fracture crack trajectory, separation of the seam allowance at small bending angles and changes in the loading scheme of the partial seam allowance, as well as by increasing the elasticity of the elastic medium. Without complication of tooling, the localization of the source of plastic deformation can be achieved by sequential separation of the allowance. This type of separation is created by structural elements of the dies, which ensure a consistent increase in the pressure of the elastic medium along the contour of the slice. Localization of pressure ensures the separation of the allowance, first in one zone of the part contour, and then in the rest. At the same time, due to the smaller bending angle of the allowance, at the moment of crack formation, the thinning of the workpiece in the separation zone is reduced. In the pneumatic impact installation model TA-1324, this is realized by an elastic block having a variable thickness. In the proposed method of separation of parts of complex contours, this is achieved by changing the height of the template in the range from 1.5 to 3-3.5 thicknesses of the workpiece, then the fracture crack appears at smaller bending angles of the stock and thus provides separation with less thinning of the workpiece in the separation zone. The proposed ways to improve pneumatic impact stamping provide cutting, punching of parts from sheet copper, aluminum alloys with a thickness of 0.3..10 mm and mild steel up to 2 mm thick. The achieved roughness of the cut surface on details is  $Ra=0,3...0,6$   $\mu\text{m}$ , and in the case of high-strength materials with a thickness of 4...5 mm with a roughness of the cut surface  $Ra=0,6...1,0$   $\mu\text{m}$ .

**Keywords:** punching, cutting, thin sheet, pneumatic impact, stamping, elastic, medium, polyurethane.



**Введение.** Разделительные операции в металлообрабатывающей промышленности – вырубка, пробивка, выполняемые методом штамповки эластичной средой (полиуретан), получили широкое распространение благодаря простоте и универсальности применяемой штамповой оснастки и существующего прессового оборудования.

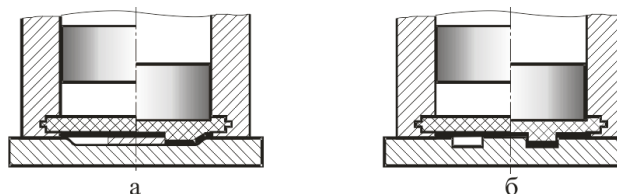


Рис. 1 – Основные технологические схемы штамповки эластичной средой (полиуретаном марки СКУ-7Л, СКУ-ПФЛ): а – пробивка, б – вырубка

Значительные скорости деформирования и высокий уровень развиваемого импульсного давления, как показали сравнительные исследования, позволяют существенно повысить качество и точность листовых деталей при разделительных операциях (пробивка, вырубка) [6–7].

Исследование процессов разделения листового материала эластичной средой толщиной более 1,0 мм и при этом повышение геометрической точности среза представляется актуальной задачей.

**Цель работы:** установление путей совершенствования пневмоударных разделительных процессов листовой штамповки на основании исследований закономерностей пластического течения, разрушения и формирования поверхности среза.

**Основной материал.** Как показывает практика и результаты исследований, выполненных в ряде известных работ [1,2], при разделении листового материала эластичной средой на срезе имеется характерная утяжина, что существенно снижает качество получаемых деталей. Величина утяжины растет с увеличением толщины заготовки, высоты шаблона, с уменьшением отношения  $\sigma_T/\sigma_B$  и др.

Закономерности развития деформации установлены с учетом характера нагружения заготовки при разделении в штампах с одной эластичной рабочей частью. Процесс включает такие этапы: изгиб заготовки около острой кромки шаблона, сдвиг разделяемых частей и изгиб припуска с растяжением вплоть до разделения частей.

На первом этапе поле линий скольжения подобно полю при гибке широкой полосы (Рис. 2, а). Отличием является действие сосредоточенной силы вдоль контура разделения вследствие некоторого отставания заготовки от плоскости шаблона.

**Анализ проблемы и постановка задачи исследования.** Существенным недостатком статического метода штамповки является наличие заусенцев на деталях, а это в свою очередь требует дополнительных затрат для их удаления и улучшения качества среза [1–5].

Одним из направлений повышения геометрической точности детали – это использование процесса пневмоударной штамповки эластичной средой (рис. 1).

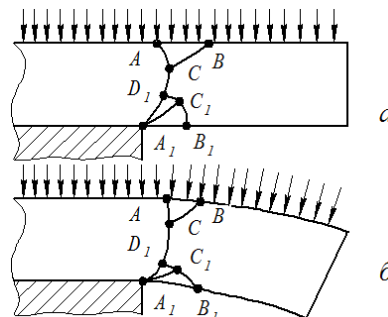


Рис. 2 – Поле линий скольжения на первом этапе разделения: а – начальный момент, б – следующий момент

Среднее нормальное напряжение вдоль АВ будет  $\sigma_{AB} = k - q$ , а вдоль  $A_1B_1$   $\sigma_{A_1B_1} = -k$  (здесь  $k$  – сопротивление материала заготовки сдвигу). Треугольные области поверхностей листовой заготовки соединяются изолированной линией скольжения, если  $k_{ABC} \neq k_{A_1B_1C_1}$  или имеют общую точку разрыва напряжений при  $k_{ABC} = k_{A_1B_1C_1}$ .

Угол изолированной круговой линии скольжения определим из соотношения

$$\frac{q}{2k} + \varepsilon + \delta = 1, \quad (1)$$

где  $\varepsilon, \delta$  – углы вера  $C_1A_1D_1$  и линии  $D_1C$  соответственно.

Увеличение давления среды ( $q$ ) ведет к снижению суммы  $\varepsilon + \delta$ , т.е. к сокращению и отклонению области ABC в сторону припуска, спрямлению дуги  $D_1C$  (Рис. 2, б).

Поле линий скольжения, реализующееся на втором этапе разделения показано на рис. 3, а. Вдоль контура bc среднее напряжение  $k$ , а внутри области abc напряженное состояние описывается зависимостями:

$$\sigma_r = 2k \ln \frac{\rho}{r}; \quad (2)$$

$$\sigma_\phi = 2k \left( 1 - \ln \frac{\rho}{r} \right), \quad (3)$$

где  $\varepsilon, \delta$  – радиусы наружного контура и контура на котором находится рассматриваемый участок;  
 $\sigma_r, \sigma_\phi$  – радиальные и тангенциальные напряжения рассматриваемой точке.

Растягивающие напряжения на участке  $bc$  переходят затем на участке  $c_1c_2$  в сжимающие. В силу этого вблизи точки  $b$  наблюдается наиболее жесткая

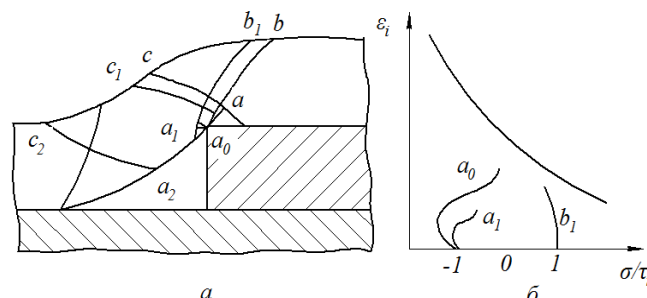


Рис. 3 – Поле линий скольжения: а – реализующееся на втором этапе; б – накопление интенсивности деформации сдвига

При разделении пластичных материалов разрушения на ранней стадии не происходит, так как в окрестности точки  $b_1$   $\varepsilon_i < \varepsilon_{i, np}$ . Здесь  $\varepsilon_{i, np}$  – допустимая интенсивность деформации сдвига при  $\sigma/\tau_i = 1$ .

По мере внедрения шаблона в заготовку усиливается локализация интенсивной деформации у его кромки, т.е. в окрестности точки  $a_0$ , а также вдоль линии  $a_0b$ . Следует заметить, что на этом этапе, как и ранее, наложение давления вдоль  $bc$  способствует сокращению треугольной области  $abc$  и отклонению ее в сторону припуска.

С ростом давления  $q$ , как видно из соотношения

$$\frac{q' - q}{2k} = \delta + \varepsilon, \quad (4)$$

на поверхности контакта заготовки с шаблоном растет кривизна сторон треугольника  $abc$ , что свидетельствует о снижении радиуса скругления среза. Трещина зарождается у кромки  $a_0$  и развивается вдоль  $a_0b$ , где интенсивность деформации сдвига получает наибольшее приращение.

Таким образом, в зависимости от допустимой интенсивности деформации сдвига может реализоваться один из двух рассмотренных механизмов разрушения, приводящих к характерной форме среза. На рис. 4 показаны примеры срезов деталей из пластичных (а) и малопластичных (б) материалов. Анализ геометрической формы срезов у различных материалов показал хорошее совпадение их с показанными теоретическими. Видно, что управление траекторией трещины разрушения путем

схема напряженного состояния, характеризуемая показателем  $\sigma/\tau_i = 1$  ( $\tau_i$  – интенсивность касательных напряжений;  $\tau_i = k$  на линиях скольжения).

Накапливание интенсивности деформаций сдвига  $\varepsilon_i$  идет, как показано на рис. 3, б. На ранних стадиях процесса в окрестности точки  $b_1$  (рис. 3, а) возможно появление трещины разрушения, поскольку здесь наиболее интенсивно идет исчерпание ресурса пластичности. Для малопластичных материалов, например БрБ2Т, трещина зарождается на поверхности заготовки в окрестности точки  $b_1$  и развивается вдоль линии скольжения  $b_1a_1$ .

изменения пластических свойств материала ограничено.

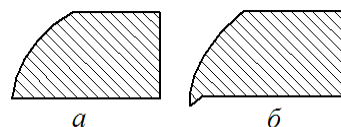


Рис. 4 – Примеры среза деталей: а – пластичных материалов, б – малопластичных

Эффективнее будут пути, приводящие к уменьшению утонения заготовки в зоне изгиба к моменту разрушения и предопределяющие целесообразное направление трещины.

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования процесса разделения листового металла эластичной средой позволили установить пути совершенствования вырубки, пробивки. В основу положено улучшение геометрической точности поверхности среза при толщине заготовки более 1 мм. Это направление реализуется в схемах локализации очага пластической деформации и управления траекторией трещины разрушения, отделения припуска при небольших углах его изгиба и изменения схемы нагружения разделяемого припуска, а также за счет повышения твердости эластичной среды.

Особо следует отметить, что улучшение технологических параметров процесса вырубке, пробивки листового металла эластичной средой не должно проходить при увеличении сложности штамповой оснастки, так как при этом теряется основное преимущество процесса – простота, легкость изготовления инструмента, малая себестоимость.

Не прибегая к усложнению оснастки, локализацию очага пластической деформации можно обеспечить при последовательном отделении припуска. Такой характер разделения создается конструктивными элементами штампов, обеспечивающими последовательное увеличение давления эластичной среды вдоль контура среза. Локализация давления обеспечивает разделение припуска сначала в одной зоне контура детали. При этом за счет меньшего угла изгиба припуска к моменту образования трещины снижается утонение заготовки в зоне разделения. Это направление реализуется за счет имеющего переменную толщину эластичного блока в пневмоударной установке модели ТА-1324. В этом случае разделение заготовки начинается в зоне, соответствующей меньшей толщине блока эластичной среды, так как здесь больше локальное давление и выше степень деформации.

Аналогичные результаты достигаются в штампе, в котором обеспечивается переменный угол изгиба припуска вдоль контура вырубаемой детали.

В предлагаемом методе разделения деталей сложных контуров используется тот факт, что отделение припуска происходит одновременно по всему контуру детали. В этом случае трещины разрушения образуются сначала на участках с большой кривизной контура детали, так как здесь наиболее жесткая схема напряженно-деформированного состояния.

Управление формированием поверхности среза достигается путем изменения высоты шаблона в пределах от  $H_1=1,5S$  ( $S$  – толщина стальной заготовки) до  $H_2=(3-3,5)S$ , тогда трещина разрушения появляется при меньших углах изгиба припуска и тем самым обеспечивается разделение при меньшем утонении заготовки в зоне разделения.

Предложенные пути совершенствования пневмоударной штамповки обеспечивают вырубку, пробивку деталей из листовых медных, алюминиевых сплавов толщиной 0,3..10 мм и малоуглеродистой стали толщиной до 2 мм. Достигаемая шероховатость поверхности среза на деталях составляет  $Ra = 0,3...0,6$  мкм, а в случае высокопрочных материалов толщиной до 4...5 мм с шероховатостью поверхности среза  $Ra = 0,6...1,0$  мкм.

**Заключение.** В процессе разделения листовой заготовки эластичной средой реализуются следующие этапы: изгиб заготовки около острой кромки шаблона, сдвиг разделяемых частей и изгиб припуска с растяжением вплоть до их разделения. В зависимости от допустимой деформации сдвига материала заготовки возможны два механизма разрушения, приводящие к неодинаковой форме среза полученной

детали. Показаны пути совершенствования вырезки деталей эластичной средой, способствующие повышению геометрической точности среза.

#### Список литературы

1. Исаченков Е. И. Основные направления повышения эффективности и качества листовой и объемной штамповки. *Качество и эффективность при листовой и объемной штамповке*, Москва: МДНТП, 1977. С. 3–8.
2. Комаров А. Д., Киселев В. А., Бальчикова Е. М. Влияние технологических факторов на точность и качество деталей, вырезанных эластичной средой. *Повышение эффективности кузнечно-штампового производства. Тезисы докладов республиканской конференции*. Кишинев, 1977. С. 6–9.
3. Баранов Н. Ф. О механизме разделения металла при резке эластичной средой. *Кузнечно-штамповое производство*. 1981. № 3. С. 24–26.
4. Тимошенко В.А., Богоев В.С., *Разделение листового металла эластичными средами* / ред. Токи А. В. Кишинев: Штиинца, 1988. 106 с.
5. Кокорин В.Н. Титов Ю.А., Таловеров В. Н., Федорова Л.В. *Специальные способы обработки металлов давлением*. Ульяновск: УлГТУ, 2006. 36 с.
6. Фролов Е. А., Манаенков И. В., Дякова Т. В. Оценка качественных показателей деталей из листа при операциях пробивки – вырубки эластичной средой на пневмоударном оборудовании. *Збірник наукових праць УДАЗТ*. Харків: Українська державна академія залізничного транспорту. 2008. Вип. 99. С. 250–256.
7. Фролов Е. А., Мовшович А. Я., Манаенков И. В. и др. *Пневмоударная и статико-динамическая штамповка сложнорельефных листовых деталей упругими средами*. Харьков: УГАЖТ, Краматорск: ДГМА, 2010. 287 с.

#### References (transliterated)

1. Isachenkov Ye. I. *Shtampovka rezinoy i zhidkostyu* [Stamping with rubber and liquid]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1967. 364 p.
2. Komarov A. D. Kiselev V. A., Balychkova E. M. [The influence of technological factors on the accuracy and quality of parts cut by an elastic medium]. *Povyshenie effektivnosti kuznechno-shtampovogo proizvodstva. Tezisy dokladov respublikanskoi konferentsii* [Improving the efficiency of forging and stamping production. Abstracts of the Republican Conference]. Chisinau, 1977. pp 6–9.
3. Baranov N. F. O mekhanizme razdeleniya metalla pri rezke elastichnoi sredoi [On the mechanism of separation of the metal when cutting elastic medium]. *Kuznechno-shtampovoe proizvodstvo*. 1981, No. 3. pp. 24–26.
4. Timoshchenko V.A., Bogoev V.S., Toki A. V. *Razdelenie listovogo metalla elastichnymi sredami* [Separation of sheet metal by elastic media]. Chisinau: Shtiintsya, 1988. 106 p.
5. Kokorin V.N. Titov Yu.A., Taloverov V. N., Fedorova L.V. *Spetsial'nye sposoby obrabotki metallov davleniem* [Special methods of metal forming]. Ulyanovsk: USTU, 2006. 36 p.
6. Frolov E. A., Manaenkov I. V., Dyakova T. V. Assessment of the quality indicators of parts from a sheet during punching-cutting operations with an elastic medium on a pneumatic impact equipment. *Zbirnik naukovikh prats' UDAZT* [Collection of scientific works USART]. Xarkov: Ukrainian State Academy of Railway Transport. 2008. 99. pp. 250–256.
7. Frolov E. A., Movshovich A. Ya., Manaenkov I. V. i dr. *Pnevmoударная i statiko-dinamicheskaya shtampovka slozhnoreliefnykh listovykh detalei uprugimi sredami* [Pneumatic and static-dynamic stamping of sticky-relief sheet parts by elastic media]. Khar'kov: USART, Kramatorsk: DSMA, 2010. 287 p.

Поступила (received) 30.10/2018

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

**Фролов Євгеній Андрійович (Фролов Евгений Андреевич, Frolov Yevgeniy)** – доктор техн. наук, професор, ПолтНТУ ім. Юрія Кондратюка, м. Полтава, Україна. E-mail: frolov.polntu@gmail.com; ORCID: 0000-0002-2691-5386.

**Ясько Станіслав Георгійович (Ясько Станислав Георгиевич, Yasko Stanislav)** – ст. викладач, ПолтНТУ ім. Юрія Кондратюка, Полтава, Україна. E-mail: s.g.yasko@gmail.com; ORCID: 0000-0001-6228-705X.

**Агарков Віктор Васильович (Агарков Виктор Васильевич, Agarkov Viktor)** – канд. техн. наук, заст. директора-поч. лабораторії, Державне підприємство «Харківстандартметрологія», м.Харків, Україна. e-mail: 290@mtl.kharkov.ua.

**Кравченко Сергій Іванович (Кравченко Сергей Иванович, Kravchenko Sergiy)** – канд. техн. наук, доцент, ПолтНТУ ім. Юрія Кондратюка, Полтава, Україна. E-mail: 050Ser09@i.ua; ORCID: 0000-0003-3250-8645.

## ЗМІСТ

<b>Алієва Л. І., Картамишев Д. О., Махмудов К. Д., Чучин О. В.</b> Енергосилові параметри процесів холодного видавлювання порожнистих деталей.....	3
<b>Аргат Р. Г., Пузир Р. Г., Вакуленко Р. А.</b> Вплив анізотропії і зміцнення металу на втрату стійкості фланця при витягуванні циліндричної деталі без складкоутримувача.....	10
<b>Бардачѳв Ю. Н., Розов Ю. Г.</b> Современные проблемы инженерного образования в Украине и возможные пути их решения на примере Херсонского национального технического университета.....	15
<b>Плеснецов Ю. А., Сучков Г. М.</b> Экспериментальные исследования процесса валковой формовки профилей настилов с просечно-вытяжными элементами.....	22
<b>Калюжний В. Л., Касян Д. В., Русаков Р. Л.</b> Аналіз методом скінчених елементів процесу неповністю відкритого відрізання заготовок із круглого прокату зсувом у штампі на пресі.....	27
<b>Коновалов Ю. В., Кармазіна І. В., Присяжний А. Г., Кухар В. В.</b> Методика експериментального дослідження енергосилових режимів прокатки жерсті при різних параметрах станів холодної прокатки.....	32
<b>Парусов Е. В., Губенко С. І., Парусов О. В., Чуйко І. М.</b> Розробка сучасного енергоефективного способу виробництва холоднодеформованої арматури для поперечно напружених залізобетонних конструкцій.....	39
<b>Плеснецов С. Ю.</b> Спосіб та електромагнітно-акустичний перетворювач для контролю трубчастих неферомагнітних металовиробів з перетином у вигляді кола.....	46
<b>Подколзин М. В., Кузьменко В. И., Левченко В. Н., Кузьменко Е. А., Биба Н. В.</b> Исследование процесса и разработка технологии горячей объёмной штамповки заготовок колец подшипников.....	51
<b>Полянский В. И.</b> Теоретическое определение шероховатости поверхности при высокоскоростном фрезеровании и шлифовании.....	58
<b>Потятиник А.М., Горностай В.М., Сабол С.Ф., Головка О.С., Єфремов М.О., Брензей А.О.</b> Визначення впливу початкового положення заготовки на параметри процесу холодного зворотного видавлювання порожнистих виробів з роздачою.....	63
<b>Ремез О. А., Огинский И. К.</b> Моделирование процесса непрерывной прокатки в калибрах системы «ОВАЛ-КВАДРАТ».....	68
<b>Середа Б. П., Кругляк И.В., Гайдаенко А.С.</b> Получение инновационных алитированных покрытий на конструкционных материалах, работающих в условиях коксохимического производства.....	75
<b>Середа Б.П., Палехова И.В.</b> Инновационная технология упрочнения конструкционных материалов легированными титановыми покрытиями.....	80
<b>Тараненко М. Е.</b> Совершенствование качества автокузовных листовых деталей.....	85
<b>Фролов Е. А., Ясько С. Г., Агарков В. В., Кравченко С. И.</b> Совершенствование процессов разделения листового материала эластичной средой.....	89

## CONTENT

<b>Aliieva L. I., Kartamyshev D. O., Mahmudov K. D., Chuchin O. V.</b> Energy-power parameters of cold-extracting processes of the hollow parts.....	3
<b>Arhat R. G., Puzyr R. G., Vakulenko R. A.</b> Influence of anisotropy and strengthening of metal on the loss stability of the flange when drawing cylindrical details without the folde.....	10
<b>Bardachev Yu. N., Rozov Yu. G.</b> Modern tendencies of development of engineering education in Ukraine on the example of Kherson national technical university.....	15
<b>Plesnetsov Yu. A., Suchkov G. M.</b> Experimental research of the process of the roll forming profiles of cuttings with cross-extension elements.....	22
<b>Kaljuzhny V., Kasian D., Rusakov R.</b> Analysis of the process of incompletely open cutting of workpiece of a round metal rods with shear in press die by the finite element method.....	27
<b>Konovalov Yu. V., Karmazina I. V., Prysiazhny I., Kukhar V. V.</b> Experimental research methodology of energy and power modes for tinsplate rolling at different parameters of cold rolling mills.....	32
<b>Parusov E. V., Gubenko S. I., Parusov O. V., Chuiko I. N.</b> Development modern energy-efficient method of production of cold-deformed armature for prestressed reinforced concrete construction.....	39
<b>Plesnetsov S. Yu.</b> Method and electromagnetic-acoustic transducer for testing of non-ferromagnetic metal products of circular cross-section.....	46
<b>Podkolzin M. V., Kuzmenko V. I., Levchenko V. N., Kuzmenko E. A., Biba N. V.</b> The researching of the process and development of the technology of hot volume stamping of bearings rings workpieces.....	51
<b>Polyanskiy V. I.</b> Theoretical determination of surface roughness during high-speed milling and grinding.....	58
<b>Potiatynyk A.M., Hornostai V.M., Sabol S.F., Golovko O.S., Yefremov M.O., Brenzey A.O.</b> Determination of influence of initial position of purveyance on the parameters of process of the cold reverse squeezing out of hollow wares with distribution.....	63
<b>Remez O. A., Oginskij I. K.</b> Simulation of the process of continuous rolling in the passes of the system “OVAL–SQUARE.....	68
<b>Sereda B. P., Kruglyak I.V., Gaydaenko A.S.</b> Obtaining of the innovative alited coatings on construction materials working in the conditions of coxochemical manufacture.....	75
<b>Sereda B.P., Palekhova I.V.</b> Innovative technology of strengthening of construction materials with alloyed titanium coatings.....	80
<b>Taranenko M. E.</b> Quality perfection of car-body sheet articles.....	85
<b>Frolov Ye., Yasko S., Agarkov V., Kravchenko S.</b> Perfection of the processes of separation of sheet material by elastic medium.....	89



НАУКОВЕ ВИДАННЯ

**ВІСНИК НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ «ХП».  
СЕРІЯ: ІННОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ОБЛАДНАННЯ ОБРОБКИ МАТЕРІАЛІВ  
У МАШИНОБУДУВАННІ ТА МЕТАЛУРГІЇ**

**Збірник наукових праць**

**№ 30 (1306) 2018**

Наукові редактори: Марченко А.П., д-р техн. наук, професор, НТУ «ХП», Україна,  
Плеснецов Ю.О., канд. техн. наук, ст. н. с., НТУ «ХП», Україна

Технічний редактор: Курандо О.С., інженер I категорії, НТУ «ХП», Україна

Відповідальний за випуск Обухова Г. Б., канд. техн. наук

**АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ:** 61002, Харків, вул. Кирпичова, 2, НТУ «ХП».  
Кафедра обробки металів тиском  
Тел.: (057) 707-60-40; e-mail: omd.conf@gmail.com

Обл.-вид. № 30-18.

Підп. до друку 30.10.2018 р. Формат 60x84 1/8. Папір офсетний. RISO-друк. Гарнітура Таймс. Ум. друк.  
арк. 8,73. Обл.-вид. арк. 9,8.

Наклад 100 прим. Зам. No 19. Ціна договірна.

---

Видавничий центр НТУ «ХП».

Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 5478 від 21.08.2017 р..

61002, Харків, вул. Кирпичова, 2

---

Видавництво та друк ФО-П Шейніна О.В.

61052, Україна, м. Харків, вул. Слов'янська, 3

Тел. 057 759-48-79

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до Державного реєстру видавців, виготівників і  
розповсюджувачів видавничої продукції

ДК No 2779 від 28.02.2007 р.