

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

ВІСНИК
НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
«ХПІ»

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

№ 43 (1265) 2017

Збірник наукових праць
Видання засновано у 1961 році

Харків
НТУ «ХПІ» 2017

Вісник Національного технічного університету «ХПІ»

Збірник наукових праць. Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2017. – № 43 (1265) – 87 с.

Державне видання

Свідоцтво Держкомітету з інформаційної політики України

КВ № 5256 від 2 липня 2001 року

Збірник виходить українською та російською мовами.

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

Координаційна рада:

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

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

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

Редакційна колегія серії:

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

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

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

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

Рекомендовано до друку вченою радою НТУ «ХПІ»

Протокол № 8 від 27 жовтня 2017 р.

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

BULLETIN
OF
THE NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY
«KHARKIV POLYTECHNIC INSTITUTE»

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

No 43 (1265) 2017

Collected Works

The publication was founded in 1961

Kharkiv
NTU "KhPI" 2017

Collected Works. Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2017. – No 43 (1265) – 87 p.

State Edition

Certificate of State Committee of Ukraine for Information Policy

KB No 5256 from July 2, 2001

The collection is published in Ukrainian and Russian.

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

Coordinating Council:

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

K.A. Gorbunov, PhD. (secretary)

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

The editorial board of the series:

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

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

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

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

Recommended for publication by the Academic Council of NTU "KhPI"
Protocol No 8 from October 27, 2017

УДК 621.74: 669

А.К. АВТУХОВ, О.С. ПОЛЯНСКИЙ**МЕТОДИКА І МЕТОДОЛОГІЯ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ ПРОКАТНИХ ВАЛКІВ З ХРОМОНІКЕЛЕВОГО ЧАВУНУ**

Показано, що збільшення продуктивності прокатних станів при одночасному підвищенні вимог до характеристик прокату висуває все більш високі вимоги до якості валків, підвищення терміну їх служби. Обґрунтовано способи забезпечення споживчих властивостей валків, які повинні базуватися на аналізі вивчення інформації про сферу їх застосування, способів виготовлення і причин виникнення відмов. Вказано обладнання для аналізу фазового складу в хромонікелевих чавунах. Наведено алгоритм для детального аналізу експлуатаційної надійності валків, який враховує такі середні параметри як: число установок, напрацювання за установку, середньоквадратичне відхилення напрацювання за установку, витрати робочого шару за установку, знімання робочого шару, ресурс, початковий діаметр, ефективність використання робочого шару, а також коефіцієнт списання валків за зносом і дефектами.

Ключові слова: методика, методологія, хромонікелевий чавун, експлуатаційна стійкість, умови експлуатації, хімічний склад, фазовий склад.

Показано, что увеличение производительности прокатных станов при одновременном повышении требований к характеристикам проката выдвигает все более высокие требования к качеству валков, увеличению срока их службы. Обоснованы способы обеспечения потребительских свойств валков, которые должны базироваться на анализе изучения информации о сфере их применения, способов изготовления и причин возникновения отказов. Приведено оборудования для анализа фазового состава в хромоникелевых чугунах. Представлен алгоритм для детального анализа эксплуатационной надежности валков, который учитывает такие средние параметры как: число установок, наработки по установке, среднее отклонение наработки за установку, затраты рабочего слоя за установку, снятие рабочего слоя, ресурс, начальный диаметр, эффективность использования рабочего слоя, а также коэффициент списания валков по износу и дефектами.

Ключевые слова: методика, методология, хромоникелевый чугун, эксплуатационная стойкость, условия эксплуатации, химический состав, фазовый состав.

It is shown that increasing the productivity of rolling mills simultaneously with increasing the requirements for rolling characteristics sets up higher demands on the quality of rolls and a longer service life. It is substantiated the ways of ensuring the consumer properties of rolls, which should be based on the analysis of information on the scope of their use, methods of manufacturing and causes of failures. It is given the equipment for the analysis of phase composition in chromium-nickel cast irons. It is presented an algorithm for the detailed analysis of the operational reliability of rolls, which takes into account such average parameters as follows: the number of installations, the installation operating time, the average deviation of the installation operating time, the cost of the working layer for the installation, the removal of the working layer, the initial diameter, the efficiency of the working layer, and also the write-off ratio of rolls on wear and defects. It is proposed a methodical approach to the theoretical evaluation of crystallization of cast rolls of sheet rolling mills. It is introduced the research methodology, with the use of theoretically grounded new approaches to increase the durability of rolling rolls at all stages of the life cycle of their production and operation.

Keywords: methodology, methodology, chromium-nickel cast iron, operational stability, operating conditions, chemical composition, phase composition.

Вступ. В теперішній час на сорто- і листопрокатних станах знайшли широке застосування прокатні валки з хромонікелевого чавуну [1]. Чавунні леговані валки виконання СПХН і СПХНМ широко застосовують на всіх типах сортопрокатних станів. Двошарові хромонікелеві валки виконань ЛПНХд і ЛПХНМд знаходять застосування в клітках безперервних і напівнеперервних ширококутових, середньо- і товстолистових, а також дресировувальних станів [2].

Актуальність роботи. Умови роботи валків станів гарячої прокатки характеризуються циклічним впливом температури (близько 600°C) і питомих тисків (до 3 т/мм²). Дослідження експлуатаційної стійкості валків показали, що основними порушеннями їх працездатності є: знос, пошкодження бочки та руйнування робочого шару (відшарування і викрощки), руйнування шийок та тріфів, скол торців бочки, а також дефекти металу, що формуються при виробництві. Незадовільна якість хромонікелевих валків пов'язана з відхиленнями хімічного складу, підвищеним вмістом шкідливих домішок, засміченням розплавів компонентами, які не обумовлені нормативно-технічною документацією, неефективним модифікуванням, порушенням температурних режимів плавлення і заливки металу, неякісною підготовкою ливарної форми, недотриманням технологічних регламентів

охолодження валків в формі та параметрів їх термообробки, недостатньою глибиною робочого шару і формуванням в ньому дефектів, неоднорідністю структури металу, зональною ліквідацією компонентів.

До числа експлуатаційних чинників, що впливають на ресурс валків, належать: неефективне використання різних конструктивних типів і виконань валків; нераціональні системи їх охолодження; надмірні й нерівномірні навантаження; недотримання норм напрацювання в міжремонтні періоди тощо.

Тому при виробництві до робочого шару валків пред'являються особливі вимоги (висока твердість, зносостійкість, міцність, глибина робочого шару і мінімальний рівень залишкових напружень), які забезпечують їх високі експлуатаційні властивості та якість прокату [3].

Збільшення продуктивності прокатних станів при одночасному підвищенні вимог до характеристик прокату (точність геометричних розмірів, обробка продукції) висуває все більш високі вимоги до якості валків, збільшення терміну їх служби та економії енергоресурсів. Вирішення цих проблем для прокатних валків такого типу може бути досягнуто як застосуванням додаткового мікролегування та модифікування розплавів, так і позапічною їх обробкою та вдосконаленням технології їх

виготовлення. Виробництво валків із заданим рівнем властивостей, стабільною структурою робочого шару, надійно працюючих в умовах температур і навантажень, що циклічно змінюються, можливо лише на основі вивчення факторів, які визначають їх якість та службові властивості при експлуатації та опрацювання теоретичних, технологічних основ підвищення довговічності прокатних валків з хромонікелевого чавуну. Тому розробки, спрямовані на вирішення цих проблем, можуть бути віднесені до важливих та актуальних.

Мета роботи: розробити методологію проведення досліджень за новими підходами щодо підвищення довговічності валків шляхом теоретичних обґрунтувань на всіх етапах життєвого циклу їх виробництва й експлуатації.

Викладення основного матеріалу. Пошук шляхів підвищення експлуатаційної стійкості прокатних валків з хромонікелевого чавуну повинен базуватися на узагальненні відомих публікацій, аналізі їх властивостей і пошуку значущих чинників, що впливають на показники якості, ролі оптимізації складу сплавів, параметрів технологічних процесів їх відливання і термообробки. При цьому важлива роль повинна бути відведена вивченню умов їх експлуатації (оптимізації напрацювання в міжремонтний період, системі охолодження і підбору в комплект).

Обґрунтування способів підвищення споживчих властивостей валків повинно базуватися на аналізі вивчення інформації стосовно сфери їх застосування, способів виготовлення і причин виникнення відмов. У лабораторних та промислових умовах необхідно з'ясувати вплив хімічного складу, способів виливки, застосовуваних модифікаторів для валкових сплавів, а також ефективність використання методів позапічної обробки валкових розплавів для підвищення якості виливків.

Шляхи підвищення працездатності валків, що застосовуються, для виготовлення валків сортових (СПХН-46, СПХНМ-48) і листових (ЛПХНд-63, ЛПХНд-71, ЛПХНд-72, ЛПХНд-74, ЛПХНМдц-71, ЛПХНМдц-73) станів, відлитої методом стаціонарної та відцентрової виливки, потрібно враховувати теоретичні та експериментальні напрямки досліджень, в тому числі і з розробки енергозберігаючих технологічних процесів, коригування їх параметрів.

Аналіз причин руйнування валків доцільно виконувати органолептичними, інструментальними й експериментальними методами [4]. Величину зносу валків визначати інструментальним методом з використанням універсальних (мікрометричних з точністю вимірювання не більше 0,01 мм) і спеціальних вимірювальних інструментів. Якість металу досліджуваних валків визначати на зразках, вирізаних від припуску бочки торцевої частини валків.

Вивчення мікроструктури (вихідної і після експлуатації) проводити з використанням оптичних

мікроскопів МІМ-8 і «Heuphot-2», В6-5134 фірми «Tesla» при збільшеннях $\times 100-1000$.

Для аналізу фазового складу в хромонікелевих ічавунах використовувати електронну мікроскопію і оптико-математичну методику, засновану на гідродинамічних аналогіях, що відбуваються при формуванні фаз. За допомогою комп'ютера обробляти отримані в форматі bmp зображення отриманих мікроструктур хромонікелевого чавуну [5].

Хімічний склад чавуну оцінювати рентгеноспектральним, фотометричним методами з використанням газоаналізаторів АН-29 і АС-7012. Оцінювати розподіл хімічних елементів в локальних зонах, в тому числі, і зі структурною неоднорідністю. Дослідження проводити спектральним методом на растровому мікроскопі-аналізаторі УФМ 63-90.

Фізико-механічні властивості матеріалів валків різних виконань виконувати за стандартними методиками.

При проведенні досліджень, спрямованих на вивчення особливостей дії позапічної обробки на валкові розплави визначити вплив різних шлакоутворюючих сумішей, вакуумування і продувки азотом. Проаналізувати властивості металу після таких обробок при литві валків у виробничих умовах.

Враховуючи те, що при відновленні наплавленням хромонікелевих валків виконання ЛПХНМд-71 та ЛПХНМд-73, виникає необхідність нанесення підшару [6], вивчити можливість використовувати для цього сталі 35ХГСА і 45, нанесені електрошлаковим наплавленням.

При розробці сплавів для валків з нових матеріалів виготовляти і досліджувати виливки різного хімічного складу в лабораторних умовах. Вивчення впливу технологічних параметрів відцентрової виливки валків: температури металевої форми, товщини теплоізоляційного покриття форми, частки модифікаторів нового покоління Reseed® і Superseed®75 [7], що вводяться, температури і маси порцій металу, що заливається, час заливки й обертів машини, на структуру й експлуатаційні властивості валків проводити у виробничих умовах.

Дослідження впливу хімічного складу і технологічних параметрів лиття валків на структуру металу й їх оціночні параметри виконувати із застосуванням методів статистичної обробки експериментальних даних, планування експерименту.

При вивченні експлуатаційної надійності прокатних валків обов'язково необхідно передбачити визначення таких середніх параметрів як: число установок, напрацювання за установку, середньоквадратичне відхилення напрацювання за установку, витрати робочого шару за установку, знімання робочого шару, ресурс, початковий діаметр, ефективність використання робочого шару, а також коефіцієнт списання валків за зносом і дефектами, проаналізувати частку списання валків з причин руйнування бочки, шийки, тріф, відшарування, виникнення сітці розпалу, викрошок, тріщин,

прожогів [8]. Для детального аналізу експлуатаційної надійності валків доцільно розробити спеціальний алгоритм, який обов'язково повинен починатися з вибору наявної інформації про конкретні валки, в n кліті стану, комплексу за одну установку [9]. Ці відомості формувати у вигляді робочого масиву $A = \{a(n)\}_{n=1}^N$, де $a(n)$ – наробіток n -го валка (визначається у тонах). Масив A може складатися з 14 підмасивів A^k , кожний з яких відповідає своїй k -ій причині відмови.

На початку досліджень необхідно визначити частки $d(k)$, що характеризують структуру розподілу відмов прокатних валків за відповідних причин. Якщо n_k – кількість елементів масиву A^k , тоді

$$n_1 + n_2 + \dots + n_{14} = N \quad \text{і} \quad d(k) = n_k / N. \quad (1)$$

Для знаходження середнього наробітку за встановлення $t(k)$ при відмові через k доцільно використовувати залежність:

$$t(k) = \sum_{n(Ik)} a(n) / n_k, \quad (2)$$

де I_k – безліч індексів валків, які відмовили за k -ої причини.

Середньоквадратичне відхилення δ_k визначається як

$$\delta_k = \sum_{n(Ik)} [a(n) - t(k)]^2 / (n_k - 1)^{\frac{1}{2}}, \quad (3)$$

Далі масив A можливо впорядковувати в порядку зростання чисел $a(n)$.

Обчислювальні показники:

$$R = \text{int}(1 + 3.32 \lg N) + 1, \quad (4)$$

$$R_k = \text{int}(1 + 3.32 \lg N_k) + 1, \quad (5)$$

де $\text{int}(\dots)$ – функція цілої частини, наприклад, $\text{int}(5,2) = 5$, N_k – кількість валків, що відмовили з k -ої причини (число елементів обчислювань I_k).

При виконанні досліджень необхідно підраховувати кількість валків $N(r)$ масиву A в межах, що мають наробіток від $b(r-1)$ до $b(r)$, і валків $N_k(r)$ – від $b_k(r-1)$ до $b_k(r)$, що відмовили за причиною k відповідно. У ряді випадків може виникнути інтерес до даних про кількість валків, що відмовили за причиною k , але, що напрацювали від $b(r-1)$ до $b(r)$ тонн. Ці дані потрібно одержувати й обробляти за наведеними нижче залежностями.

Значення функції інтенсивності відмов валків внаслідок причини $\lambda_k(r)$ підраховувати за формулою:

$$\lambda_k(r) = N_k(r+1) / ([N_k - \sum_{i=1}^r N_k(i)] b_k), \quad (6)$$

$$r = 1, 2, \dots, R_k, \quad k = 10, 11, 12.$$

Середня інтенсивність відмов λ_k має вигляд:

$$\lambda_k = \sum_{r=1}^{R_k} \lambda_k(r) / R_k. \quad (7)$$

Значення параметра потоку відмов за причиною k при наробітку $r = \omega_k(r)$ виражається наступною формулою:

$$\omega_k(r) = N_k(r) / N_k b, \quad k = 1, 2, \dots, 14; \quad k \neq 10, 11, \quad (8)$$

Середня величина параметра потоку відмов ω_k має вигляд:

$$\omega_k = \sum_{r=1}^{R_k} \omega_k(r) / R_k. \quad (9)$$

Для оцінки середнього наробітку прокатних валків між відмовами t_{cp} застосовувати залежність:

$$t_{cp} = \sum_{k=1}^{14} t(k) / 14. \quad (10)$$

Середньоквадратичне відхилення δ визначається як

$$\delta = \left\{ \sum_{k=1}^{14} [t(k) - t_{cp}]^2 / 13 \right\}^{\frac{1}{2}}. \quad (11)$$

Коефіцієнт експлуатаційної надійності $K_{e.n.}$ відображає відносну ефективність прокатних валків за одну установку і якість їх виготовлення. Зношування прокатних валків є природним процесом – наслідком їх експлуатації. Інші причини відмов прокатних валків стосовно зношування небажані в значно більшому ступені. Тому показник «наробіток на відмову по зношуванню» доцільно виділити в якості заходу, щодо якого вимірюється рівень ефективності експлуатації прокатних валків. $K_{e.n.}$ є безрозмірною величиною, що змінюється в межах від 0 до 1. За допомогою цієї характеристики можна представити зміни, що відбуваються в процесі експлуатації валків, при вдосконалюванні прокатного виробництва. Загальна схема введення показників надійності типу $K_{e.n.}$ може бути наступною. Нехай $t(n, k, i, \gamma)$ – наробіток до відмови через причину k прокатного валка n у кліті γ при i -й установці, $0[\{t(\dots)\}]$ – деяка операція узагальнення інформації $t(\dots)$ і $K_n = 1$ (відмова за зносом). Тоді коефіцієнт експлуатаційної надійності $K_{e.n.}$ матиме вигляд:

$$K_{e.n.} = 0[\{t(k, n, i, \gamma)\}] / 0[\{t(l, n, i, \gamma)\}]. \quad (12)$$

Той факт, що $K_{e.n.} \leq 1$, впливає з фізичної суті процесу прокатки. Прикладом операції узагальнення може бути звичайне усереднення за установками:

$$K_{e.n.} = \frac{1}{|I|} \sum_{i(Ik)} t(k, n, i, \gamma) / \frac{1}{|I|} \sum_{i(Ik)} t(l, n, i, \gamma). \quad (13)$$

Значення коефіцієнта експлуатаційної надійності в цьому випадку можливо визначати за формулою

$$K_{e.n} = t_{cp} / t. \quad (14)$$

Аналіз коефіцієнтів експлуатаційної надійності, що характеризує відносну ефективність експлуатації прокатних валків за одну установку та якість їх виготовлення, надасть можливість розробити та впровадити заходи з покращення їх довговічності.

Для вивчення особливості формування температурного поля і відповідного структуроутворення при дозованій, порціонній заливці валків відцентровим методом, визначення рівня напружень, що виникають у них при кристалізації виливки, і розробки пропозиції щодо мінімізації витрат у виробництві та підвищення їх довговічності, доцільно розробити методичні підходи до теоретичної оцінки умов кристалізації у виливках валків листопркатних станів.

Методику розрахунків умов кристалізації доцільно розробляти на базі рівняння теплопровідності [10].

При виконанні розрахунків потрібно урахували питому теплоємність і об'ємну вагу чавуну, початкову температуру й час заливання металу, його теплопровідність, координати точок за радіусом й висотою виливків.

При розробці методики розрахунків теплоємності в зоні перекристалізації необхідно виходити з того, що температура в будь-якій точці виливка більше або дорівнює температурі перекристалізації й менше або дорівнює температурі початку фазової перекристалізації.

Відомо, що при кристалізації чавуну різниця між температурою початку й кінця фазової перекристалізації досягає 100°C. Розрахунки зміни теплоємності в такому інтервалі приводять до отримання занадто грубих результатів.

Зважаючи на те, що в процесі охолодження виливка можливо явище стрибкоподібної зміни температури (викликане локальною неоднорідністю матеріалу за хімічним складом (ліквациєю), що відрізняється часткою залишкового аустеніту часткового його розпаду) і, користуючись відомим фактором, що в інтервалі фазових переходів при кристалізації ентропія терпить розрив, у розробленій методиці доцільно надати рекомендації, що дозволять одержати більш точні розрахунки узагальненої теплоємності.

При виконанні розрахунків необхідно урахували граничні умови, які бувають трьох видів: 1-го роду, коли в деякій точці виливка відома функція температури від часу; 2-го роду, коли в деякій точці виливка відома функція від похідної температури за координатою й 3-го роду, коли в деякій точці виливка тепловий потік дорівнює коефіцієнту тепловіддачі помноженому на відому функцію від різниці температур у сусідніх точках.

Розрахунки умов кристалізації валків у металевій формі доцільно проводили в 2 етапи: перший – для валка, другий – для форми. Обидва вони пов'язані між собою тим, що тепловий потік від валка до форми той самий.

На границі форма–навколишнє середовище актуально використовувати граничні умови другого роду.

Такий підхід до оцінки стану виливка при кристалізації дозволить розробити науково обґрунтовані рекомендації до коректування технологічних параметрів лиття, забезпечити максимальний розпад залишкового аустеніту і запропонувати менш витратне і ефективне виробництво двошарових хромонікелевих валків.

Висновки. Розроблена методологія проведення досліджень надає можливість визначити послідовність виконання науково-дослідних робіт, направлених на підвищення експлуатаційної стійкості валків, що виготовляються з хромонікелевого чавуну.

Список літератури

1. Производство и применение прокатных валков : справочник / Т. С. Скобло, А. И. Сидашенко, Н. М. Александрова и др. ; под ред. Т. С. Скобло. – Х.:ЦД № 1, 2013. – 572 с.
2. *Вдовин К.Н., Гималетдинов Р.Х., Колокольцев В.М., Цыбров С.В.* Прокатные валки : монография. – Магнитогорск, МГТУ. – 2005. – 543 с.
3. *Скобло Т.С.* Прокатные валки из высокоуглеродистых сплавов/ Т.С. Скобло, Н.М. Воронцов, С.И. Рудюк ; под. ред. Скобло Т.С. – М.: Металлургия, 1994. – 336 с.
4. Ремонт машин та обладнання : підручник. / О.І.Сідашенко, О.А. Науменко, Т.С. Скобло, О.В. Тіхонов та ін. ; за ред. проф. О.І. Сідашенка, О.А. Науменка. – Х.: «Міськдрук», 2010. – 744 с.
5. *Скобло Т.С.* Применеие компьютерного анализа металлографических изображений при исследовании структуры высокопрочного чугуна/ Т.С. Скобло, О.Ю. Ключко, Е.Л. Белкин// Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – № 6. – 2012. – С. 36-42.
6. *Ксендзы Г.В.* Электрошлаковая наплавка валков горячей прокатки / Ксендзы Г.В., Фрумин И.И., Аксенов И.Н. [и др.] // Автоматическая сварка. – 1969. – № 11. – С. 60–63.
7. *Скобло Т.С.* Анализ существующих методов модифицирования высокопрочных чугунов / Т.С. Скобло, В.К. Триполко, С.А. Бурцев // Сб. Вісник ХНТУСГ. – Харьков, 2011. – № 110. – С. 193–205.
8. *В.П. Приходько* О стойкости прокатных валков. / Приходько В.П., Скобло Т.С., Чуприн С.В. // – Сталь, 1987, – № 7. – С. 58–62.
9. *Приходько В.П., Иващенко П.А.* Прокатные валки : нормы, парк, потребность, надежность / Укр.НИИмет. – Х. : Прапор, 1990. – 143 с.
10. *Скобло Т.С.* Методический подход оценки условий кристаллизации двухслойных чугуниных отливок для производства листопркатных валков. / Т.С. Скобло, А.К. Автухов, Е.Л. Белкин // Міжвузівський збірник «НАУКОВІ НОТАТКИ», вип. № 53 – Луцьк. 2016. – С. 165-169.

Bibliography (transliterated)

1. Proizvodstvo i primeneniye prokatnykh valkov : spravochnik / T. S. Skoblo, A. I. Sidashenko, N. M. Aleksandrova i dr. ; pod red. T. S. Skoblo. – Kharkiv: TSD No 1, 2013. – 572 p.
2. *Vdovin K.N., Gimaletdinov R.KH., Kolokol'tsev V.M., Tsybrov S.V.* Prokatnyye valki : monografiya. – Magnitogorsk, MG TU. – 2005. – 543 p.
3. *Skoblo T.S.* Prokatnyye valki iz vysokouglerodistykh spлавov / T.S. Skoblo, N.M. Vorontsov, S.I. Rudyuk ; pod. red. Skoblo T.S. – Moscow: Metallurgiya, 1994. – 336 p.
4. *Remont mashyn ta obladnannya. : pidruchnyk. /O.I. Sidashenko, O.A. Naumenko, T.S.Skoblo, O.V. Tikhonov ta in. ; za red. prof. O.I. Sidashenka, O.A. Naumenka. – Kharkiv: «Mis'kdruk», 2010. – 744 p.*
5. *Skoblo T.S.* Primeneiye komp'yuternogo analiza metallograficheskikh izobrazheniy pri issledovanii struktury vysokoprechnogo chuguna / T.S. Skoblo, O.Yu. Klochko,

- Ye.L. Belkin // Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov – № 6. – 2012. – P. 36–42.
6. Ksendzy G.V. Elektroshlakovaya naplavka valkov goryachey prokatki / Ksendzy G.V., Frumin I.I., Aksenov I.N. [i dr.] // Avtomaticheskaya svarka. – 1969. – № 11.– P. 60–63.
7. Skoblo T.S. Analiz sushchestvuyushchikh metodov modifitsirovaniya vysokoprochnykh chugunov / T.S. Skoblo, V.K. Tripolko, S.A. Burtsev // Sb. Visnik KHNTUSG. – Kharkiv, 2011. – № 110. – P. 193–205.
8. V.P. Prikhod'ko. O stoykosti prokatnykh valkov. / Prikhod'ko V.P., Skoblo T.S., Chuprin S.V. // – Stal', 1987. – No 7. – P. 58–62.
9. Prikhod'ko V.P., Ivashchenko P.A. Prokatnyye valki : normy, park, potrebnost', nadezhnost' / Ukr.NII metallov. – Kharkiv : Prapor, 1990. – 143 p.
10. Skoblo T.S. Metodicheskiy podkhod otsenki usloviy kristallizatsii dvukhsloynnykh chugunnykh otivok dlya proizvodstva listoprokatnykh valkov. / T.S. Skoblo, A.K. Avtukhov, Ye.L. Belkin // Mizhvuziv's'kiy zbirnik «NAUKOVÍ NOTATKI», vip. No 53 – Luts'k, 2016. – 165 p.

Надійшла (received) 23.10.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Методика і методологія проведення досліджень підвищення довговічності прокатних валків з хромонікелевого чавуну / А. К. Автухов, О. С. Полянський // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 43 (1265). – С. 5–9. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2519-2671

Методика и методология проведения исследований, направленных на повышение долговечности прокатных валков их хромоникелевого чугуна / А. К. Автухов, А. С. Полянський // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 43 (1265). – С. 5–9. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2519-2671

The methodology and methodology of research aimed at increasing the durability of rolling rolls of their chromium-nickel cast iron / A. Avtukhov, A. Polyansky // Bulletin of the NTU "KhPI". Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy. – Kh.: NTU "KhPI", 2017. – No. 43 (1265). – P. 5–9. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2519-2671

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Автухов Анатолій Кузьмич – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка, директор Учбово-наукового інститута післядипломної освіти, адреса: ул. Алчевських 44, м. Харків, Україна, 61002; тел. 732-73-28; e-mail: fpkntush@i.ua

Автухов Анатолій Кузьмич – кандидат технических наук, доцент, Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства имени Петра Василенко, директор Учебно-научного института последипломного образования, адрес: ул. Алчевских 44, г. Харьков, Украина, 61002; тел. 732-73-28; e-mail: fpkntush@i.ua

Avtukhov Anatoliy – Ph.D., associate professor, Kharkiv National Technical University of Agriculture named after Petr Vasilenko, Director of the Educational and Scientific Institute of Postgraduate Education, address: Alchevskih st., 44, Kharkov, Ukraine, 61002; tel. 732-73-28; e-mail: fpkntush@i.ua

Полянський Олександр Сергійович – доктор технічних наук, професор, Харківський національний автомобільно-дорожній університет; адрес: 61002, Україна, м. Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25, тел.: 700-38-66, e-mail: fpkntush@i.ua

Полянський Александр Сергеевич – доктор технических наук, профессор, Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет; адрес: 61002, Украина, г. Харьков, ул. Ярослава Мудрого, 25, тел.: 700-38-66, e-mail: fpkntush@i.ua

Polyansky Alexander – Doctor of Technical Sciences, Professor, Kharkiv National Automobile and Highway University; address: 61002, Ukraine, Kharkov, st. Yaroslava Mudrogo, 25, tel.: 700-38-66, e-mail: fpkntush@i.ua

УДК 621.777.4

Л. И. АЛИЕВА, Д. А. КАРТАМЫШЕВ, К. Д. МАХМУДОВ

КОМБИНИРОВАННОЕ ВЫДАВЛИВАНИЕ-РАЗДЕЛЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ ТИПА КОЛЕЦ

Существующие способы получения полых деталей типа кольца из листовых и прутковых заготовок отличаются низкой производительностью и нерациональным расходом материала. Рассмотрены различные способы безотходного получения деталей типа колец комбинированием радиального выдавливания фланца в разъемной матрице с последующим его отделением пробивкой от исходной многоштычной прутковой заготовки. Методом конечных элементов установлен характер деформированного состояния для деталей типа кольца, изучены закономерности развития напряженно-деформированного состояния заготовок. Установлено, что материальные частицы, расположенные по внутреннему диаметру вдоль продольного сечения кольца, с приближением к месту отделения детали от заготовки подвергаются немонотонной деформации с положительным значением показателя напряженного состояния. Предложены оптимальные схемы деформирования, обеспечивающие наибольшую пластичность металла в зоне разделения за счет повышения уровня гидростатического давления в очаге деформации. Для этого перед пробивкой обеспечивают переход к несвободному радиальному выдавливанию с ограничением выдавливаемого фланца по контуру. Другим приемом является выполнение одновременно с пробивкой подсадки фланцевого полуфабриката перемещением полуматрицы. Экспериментальные исследования подтвердили, что способ комбинированного радиального выдавливания с последующей пробивкой пуансоном при одновременной подсадке фланца позволяет получить детали типа колец с четко оформленным внешним контуром кольца и качественной поверхностью отверстия.

Ключевые слова: кольцо, выдавливание-разделение, подсадка, пробивка-разделение, моделирование, интенсивность деформации, напряженное состояние.

Існуючі способи отримання порожнистих деталей типу кільця з листових і пруткових заготовок відрізняються низькою продуктивністю і нерациональним витратою матеріалу. Розглянуто різні способи безвідходного отримання деталей типу кільця комбінуванням радіального видавлювання фланця в роз'ємній матриці з подальшим його відділенням пробивкою від вихідної багатоштычної пруткової заготовки. Методом кінцевих елементів встановлено характер деформованого стану для деталей типу кільця, вивчені закономірності розвитку напружено-деформованого стану заготовок. Встановлено, що матеріальні частинки, розташовані по внутрішньому діаметру уздовж поздовжнього перерізу кільця, з наближенням до місця відділення деталі від заготовки піддаються немонотонній деформації з позитивним значенням показника напруженого стану. Запропоновано оптимальні схеми деформування, що забезпечують найбільшу пластичність металу в зоні поділу за рахунок підвищення рівня гідростатичного тиску в осередку деформації. Для цього перед пробивкою забезпечують перехід до невольного радіального видавлювання з обмеженням фланця, що видавлюється по контуру. Іншим прийомом є виконання одночасно з пробивкою підсадки фланцевого напівфабрикату переміщенням полуматриці. Експериментальні дослідження підтвердили, що спосіб комбінованого радіального видавлювання з подальшою пробивкою пуансоном при одночасному підсаженні фланця дозволяє отримати деталі типу кільця з чітко оформленим зовнішнім контуром кільця і якісною поверхнею отвору.

Ключові слова: кільце, видавлювання-поділ, підсадка, моделювання, інтенсивність деформації, напружений стан.

The existing methods of obtaining hollow parts type ring from sheet and bar billets are characterized by low productivity and wasteful material consumption. Various methods of non-waste obtaining details of the type ring by combining the radial extrusion of the flange in a detachable matrix, followed by its punching from the original multi-rod bar are considered. The finite element method was used to determine the deformed state for parts type ring, and the laws governing the development of the stressed-deformed state of blanks were studied. It is established that the material particles located along the inner diameter along the longitudinal section of the ring, with the approach to the place of separation of the part from the workpiece, undergo a nonmonotonic deformation with a positive value of the stress state index. Optimal deformation schemes providing the greatest plasticity of the metal in the separation zone due to an increase in the level of hydrostatic pressure in the deformation zone are proposed. In this case, a transition to a non-free radial extrusion before punching with a restriction of the extruded flange along the contour is provided. Another technique is to simultaneously perform the punching of a flanged semi-finished product by moving the semimatrix. The method of combined radial extrusion followed by punching with a simultaneous flange insertion allows to obtain details of the type ring from the clearly defined outer contour of the ring and the qualitative surface of the hole. It was confirmed by experimental studies.

Keywords: ring, extrusion-separation, replanting, punching-separation, modeling, strain intensity, stress state.

Введение. В промышленности широко применяются детали типа колец различной конфигурации. Основные способы изготовления таких деталей являются: вырубка из листового материала; гибка мерной заготовки из калиброванной проволоки, сварка встык и штамповка детали; штамповка из трубных заготовок [1, 2]. Однако использование листового материала не обеспечивает высокого коэффициента использования металла, штамповка из калиброванной проволоки трудоемка, а использование трубного проката является дорогостоящим.

Известен способ получения колец радиальным выдавливанием с последующим отделением многоштычной заготовки от полученной детали [3]. Этот способ лишен выше перечисленных недостатков. Кроме того, радиальное выдавливание волокон металла при штамповке, что значительно улучшает качество, долговечность и износостойкость получаемых деталей. Однако, недостатком

известного способа является то, что этот способ не обеспечивает высокого качества реза (появляются заусенцы и задиры в месте реза). Это связано с тем, что пробивка осуществляется недеформированным верхним остатком заготовки, т.е. сдвигом заготовки относительно сформированного фланца.

Новые способы для изготовления колец с гладкой поверхностью отверстия осуществляются следующим образом [4–6] (рис. 1).

В матрицу 1 на торец противополопуансона 2 укладывают многоштычную заготовку 3. Полость матрицы образована двумя полуматрицами, верхней и нижней. Пуансон 4 движется вниз со скоростью $V_{п}$. С момента соприкосновения торцов пуансона и заготовки начинается деформирование последней и заполнение металлом полости матрицы, т.е. образуется фланец. На этой стадии противополопуансон 2 неподвижный (застопоренный). При столкновении металла с вертикальной стенкой полости матрицы начинается стадия несвободного радиального выдавливания (с подпором).

До конца этой стадии при получении относительно толстых фланцев (преимущественно для фланцев с соотношением $h_{\phi} / R_0 \geq 0.5$) полость матрицы заполняется практически полностью, за исключением верхнего угла на периферии фланца. Этот угол может быть заполнен при внедрении пуансона или при выполнении второго варианта способа – подсадке фланца сближением полуматриц. После этого начинается стадия пробивки, когда кроме

пуансона 4 вниз начинает перемещаться противоположный пуансон 2 с той же или меньшей скоростью. Отличительная особенность данного способа состоит в том, что при достижении пуансона верхней границы полости матрицы на стадии радиального выдавливания пуансон формирует поверхность отверстия, т.е. операция пробивки выполняется инструментом.

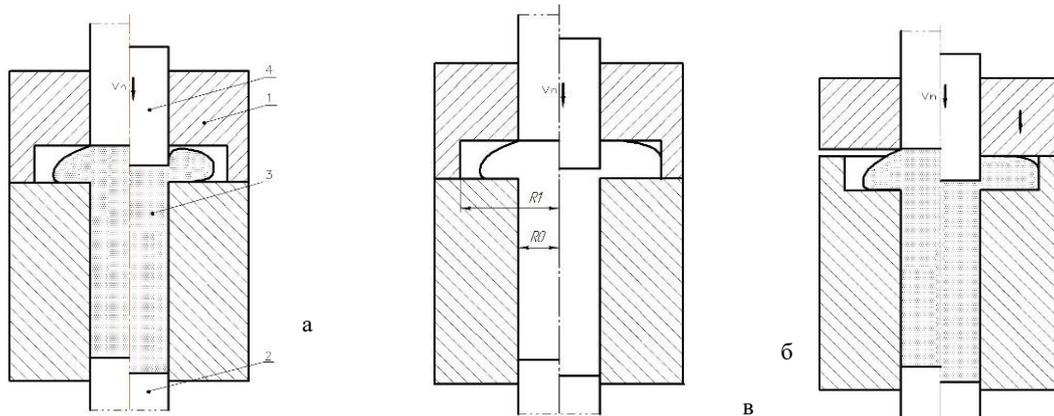


Рис. 1 – Схема деформирования деталей типа колец: а – в начале стадии радиального выдавливания (слева) и конца радиального выдавливания (справа); б – внедрение пуансона в тело фланца (слева) и пробивки отверстия (справа); в – внедрением пуансона в тело фланца (слева) и подсадкой фланца (справа)

Моделирование процесса выдавливания-разделения колец. Деформированию подлежали заготовки из сплава АД31. Кривая упрочнения которого описывается уравнением $\sigma_s = 191,5 \cdot e^{0,203}$.

Исследование напряженно-деформированного состояния (НДС) заготовки при радиальном выдавливании с последующим отделением проводили методом конечных элементов (МКЭ) в программе Deform.

Сравнение НДС проводили для трех схем (вариантов) деформирования: свободное радиальное выдавливание [3], радиальное выдавливание с подпором и внедрением пуансона и радиальное выдавливание с внедрением пуансона [4] и подсадкой фланца путем сближения полуматриц [5, 6] (рис. 1).

Установлено, что в начале деформирования (радиальное выдавливание) зона с наибольшей интенсивностью деформаций и напряжений находится вблизи кромки нижней полуматрицы (рис. 2, 3). При достижении фланцем боковой поверхности полости матрицы и внедрении пуансона во фланец напряжения возрастают во всем объеме фланца, что свидетельствует о росте гидростатического давления. Это приводит к возникновению среза (чистого сдвига) и отделению полученного фланца от многошпунтовой заготовки.

По распределению НДС видно, что для схемы радиального выдавливания с внедрением пуансона и подсадкой фланца путем сближения полуматриц наблюдается наименьшее значение интенсивности деформаций вдоль кромки фланца.

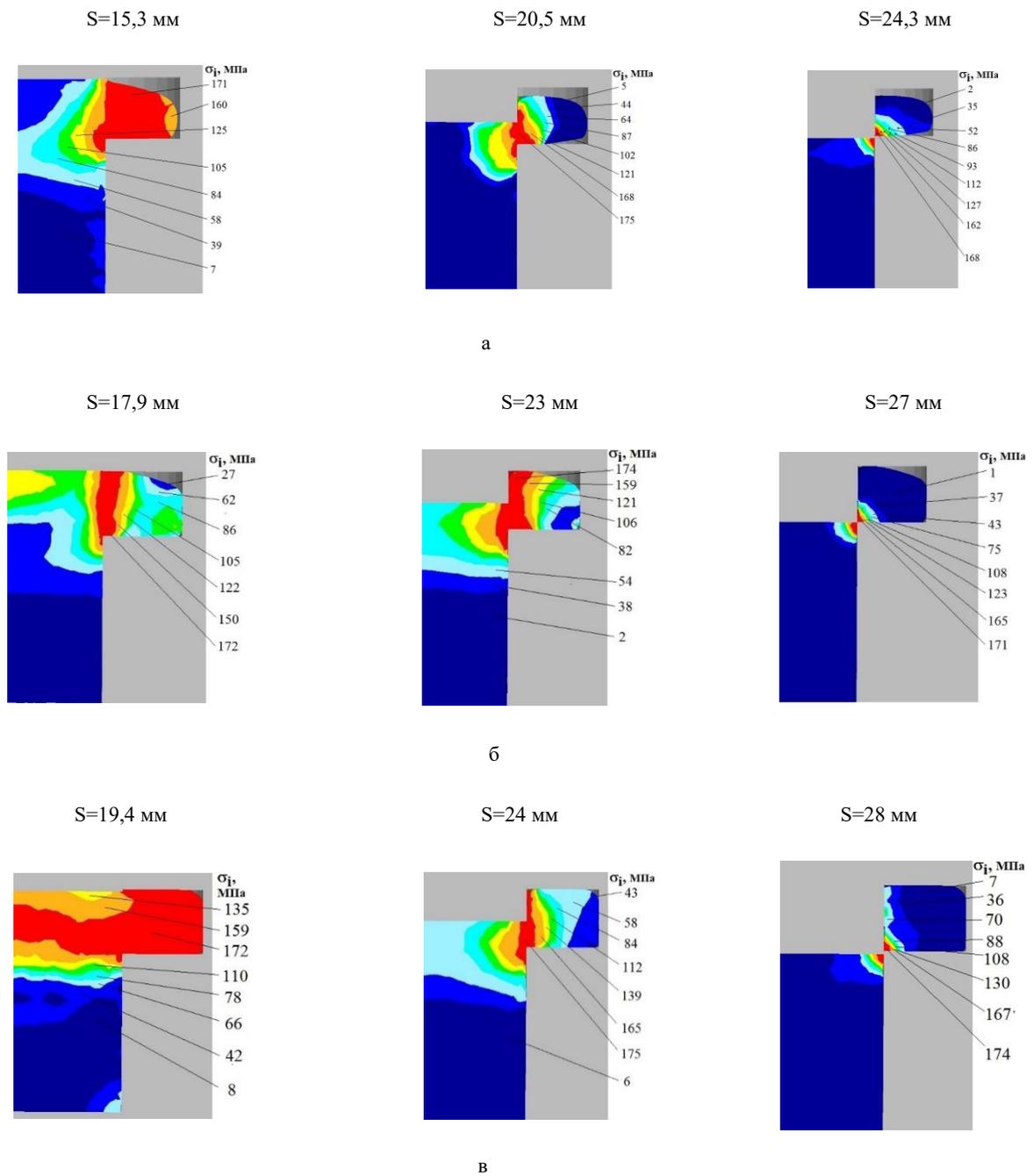


Рис. 2 – Распределение интенсивности напряжений в сечении кольца для разных ходов S для схем:
а – без подпора; б – с подпором и внедрением пуансона; в – с внедрением пуансона и подсадкой фланца

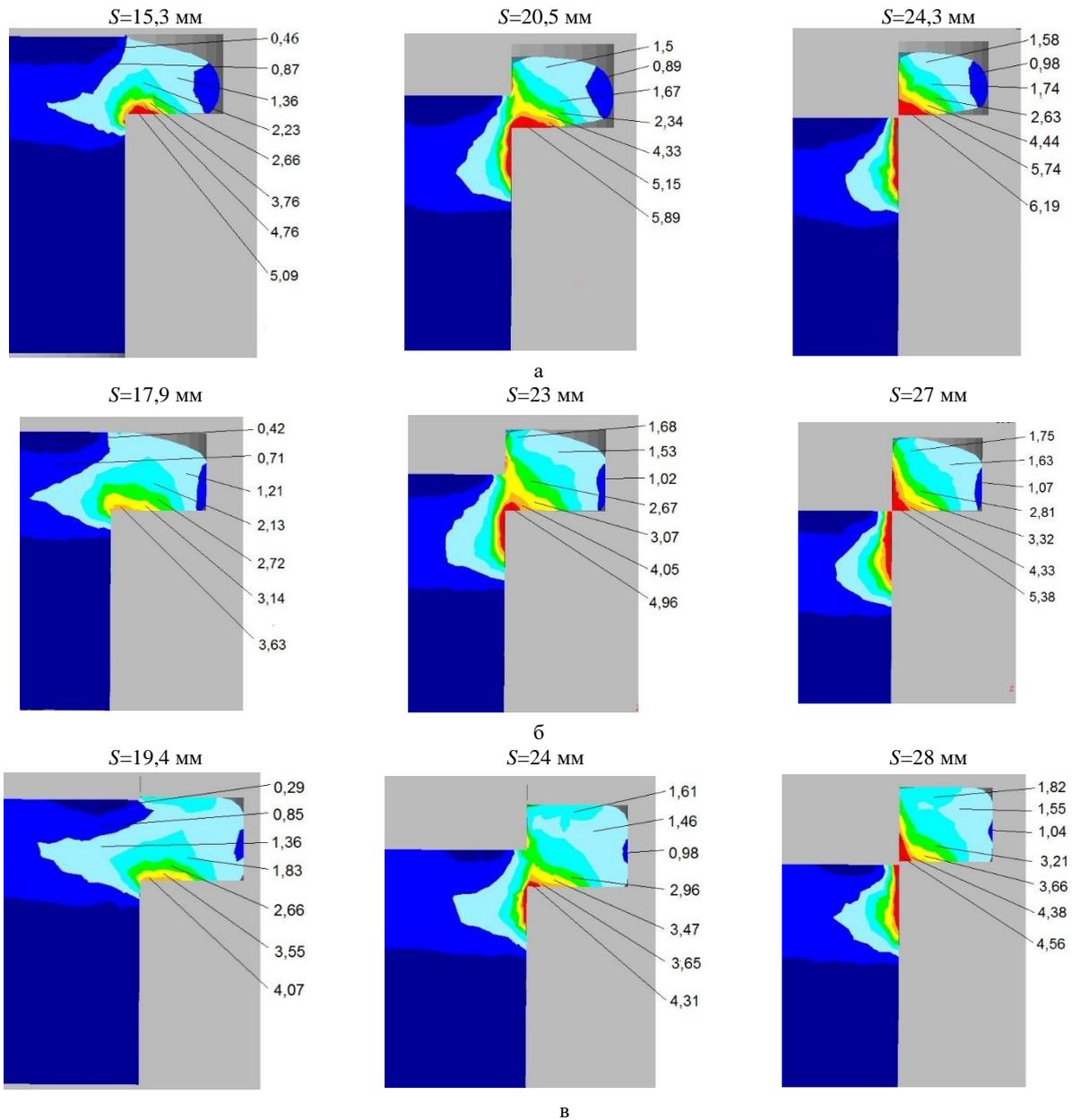


Рис. 3 – Распределение интенсивности деформаций ϵ_i в сечении кольца для разных ходов S для схем а – без подпора; б – с подпором и внедрением пуансона; в – с внедрением пуансона и подсадкой фланца

Діаграма «Путь-Сила деформування» (рис. 4) має частки, що відповідають особливостям протікаючої стадії формування кільця. На першій стадії вільного радіального видавлювання сила плавно зростає до моменту касання периферії фланца стінки матриці. Згодом відбувається різкий стрибок, практично в 1,5–2,0 рази. І після початку розділення кільця і прутка також сила різко падає і потім плавно знижується аж до повного відділення і проталкування вихідної пруткової заготовки в нижню півматрицю.

Для схем з підпором і підсадкою фланца, виділяється проміжний етап зростання сили видавлювання в процесі несвободного радіального течія металу, пов'язаного зі стиком

матеріалу з вертикальними стінками матриці або підсадкою фланца.

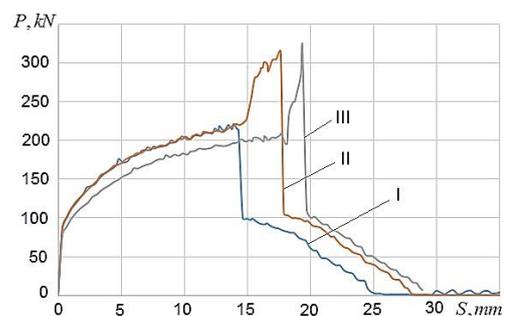


Рис. 4 – Графики изменения силы выдавливания на пуансоне

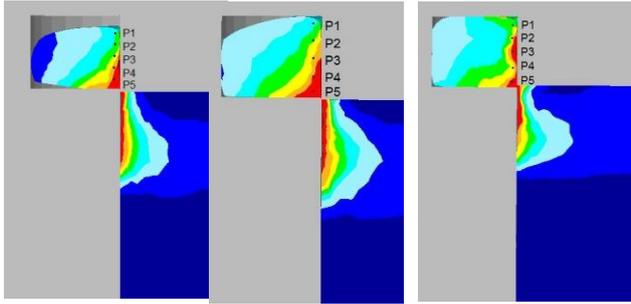
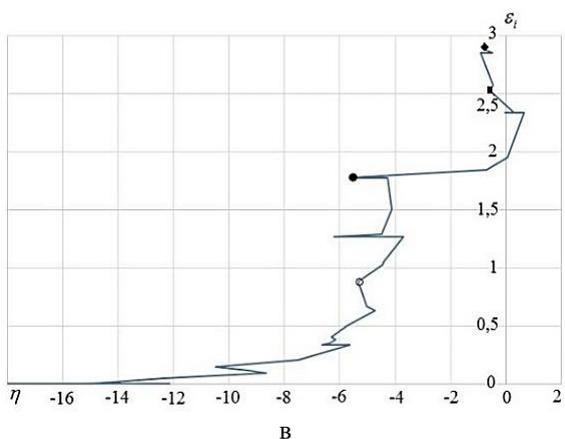
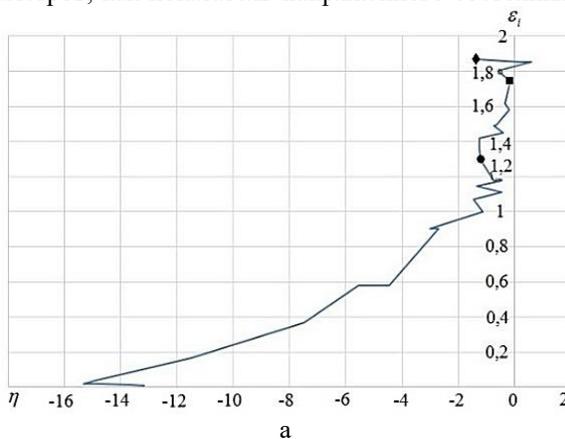


Рис. 5 – Распределение характерных точек для исследования показателя напряжённого состояния

Для прогнозирования качества поверхности среза напряженное состояние заготовки по сравниваемым трем вариантам оценивали при помощи таких параметров, как показатель напряженного состояния



[7] и величина гидростатического давления в пяти характерных точках P1–P5 на линии предполагаемого разделения (рис. 5).

$$\eta = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_i},$$

где σ_1, σ_2 , и σ_3 – главные напряжения, σ_i – интенсивность напряжений. Построенные пути деформирования в координатах $\eta = e_u$ подтвердили, что значения показателя напряженного состояния для всех точек P1–P3 в начальной стадии процесса находятся в области отрицательных величин, свидетельствуя о низкой вероятности разрушения на этой стадии. Параметр η достигал лишь незначительных положительных значений на этапе разделения заготовки (рис. 6).

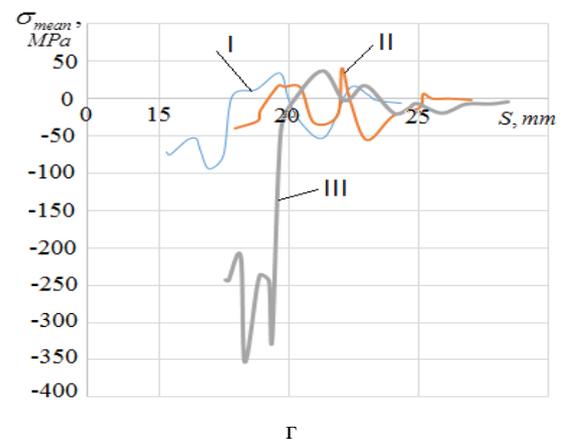
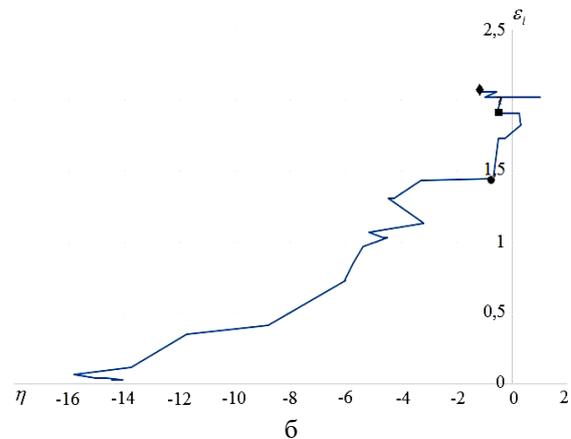


Рис. 6. – График зависимости показателя напряжённого состояния от интенсивности деформации в точке P1 для схем: а – без подпора; б – с подпором и внедрением пуансона; в – с внедрением пуансона и подсадкой фланца; г – график изменения средних напряжений от хода пуансона в точке P1

При радиальном выдавливании с внедрением и подсадкой фланца достигнуто максимальное отрицательное значение показателя η , свидетельствующее о достижении наилучшей пластичности металла. Для следующих точек также характерно нарастание гидростатического давления вначале процесса, хотя более выразительным является влияние схемы деформирования.

Характерно значительное увеличение гидростатического давления в очаге деформации во всех точках при выполнении процесса по третьему

варианту (с подсадкой фланца) до определенного момента начала разделения. Этот момент соответствует приблизительно половине пути внедрения пуансона в формируемое кольцо. Вопреки ожиданию, заметного смещения момента падения давления в ОД по ходу процесса при третьем варианте не наблюдается. То есть, момент начала зарождения трещин разрушения по пути во всех вариантах можно считать одинаковым. Но при этом, по третьему варианту во всех точках среднее напряжение превышает 300 МПа, что в 2,5–3 раза выше значения этого показателя во втором варианте процесса.

Графики изменения средних напряжений от хода пуансона представлены на рис. 7. Все значения средних напряжений в деформируемых заготовках для каждой схемы радиального выдавливания располагаются в двух зонах в зависимости от стадии процесса и перемещения пуансона. Отрицательные значения средних напряжений свидетельствуют о всестороннем неравномерном сжатии заготовки, что соответствует первому этапу радиального

выдавливания с заполнением боковой полости матрицы и столкновением с её стенками. Наименьшие значения средних напряжений зафиксированы для схемы с внедрением пуансона и подсадкой фланца, что свидетельствует о наилучшем обжатии заготовки. Переход в зону положительных значений средних напряжений совпадает с началом стадии пробивки и перемещения контрпуансона.

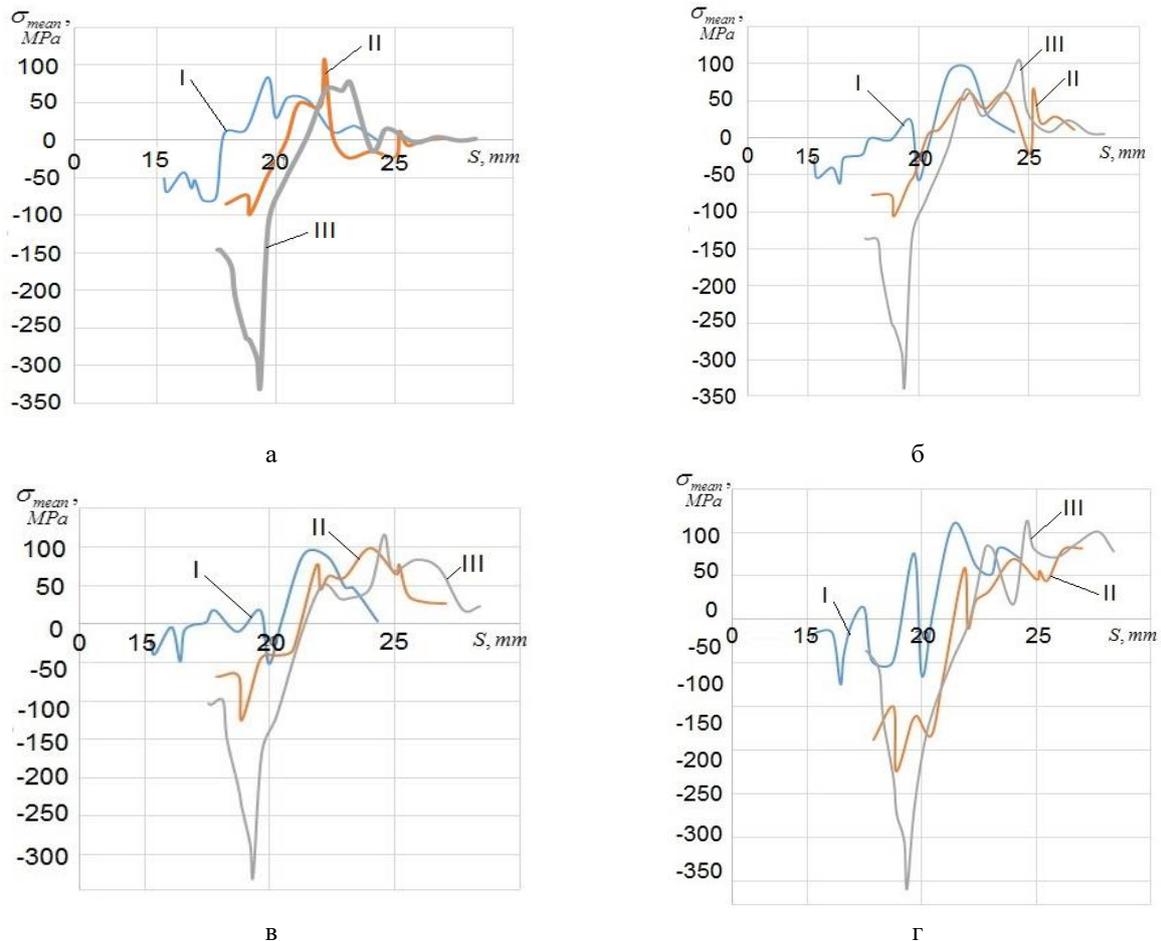


Рис. 7 – График изменения средних напряжений от хода пуансона:
 а – в точке P2; б – в точке P3; в – в точке P4 г – в точке P5

Показатель напряженного состояния η в области предполагаемого разделения заготовки и детали для схемы с внедрением пуансона в тело фланца составляет $-9,3$. А для радиального выдавливания с внедрением и подсадкой (на этапе разделения заготовки и детали) показатель напряженного состояния составил $-11,15$. Это указывает на сжимающие напряжения в этой области, а следовательно и увеличения пластичности металла и улучшения качества реза в отличие от схем со свободным истечением металла и радиального выдавливания без внедрения пуансона, где показатель напряженного состояния η составил $-0,58$ и $-5,36$ соответственно.

Процесс радиального выдавливания с последующей пробивкой пуансоном при подсадке

фланца позволяет получить детали типа колец с четко оформленной внешней поверхностью кольца и качественной поверхностью отверстия (рис. 8).



Рис. 8. – Детали типа колец, получаемые при радиальном выдавливании с внедрением пуансона в тело фланца

Выводы. Установлено, что для схемы с подсадкой фланца путём сближения полуматриц, значения средних напряжений в области отрицательных величин увеличиваются на 284 МПа,

что свидетельствует о лучшем обжатии заготовки. Установлено, что показатель напряженного состояния составил –11,15. Это указывает на сжимающие напряжения в этой области, а, следовательно, и увеличения пластичности металла и улучшения качества реза в отличие от схем со свободным истечением металла и радиального выдавливания без внедрения пуансона.

Процесс радиального выдавливания с последующей пробивкой пуансоном при подсадке фланца позволяет получить детали типа колец с четко оформленной внешней поверхностью кольца и качественной поверхностью отверстия.

Список литературы

1. Губин Ю. И. Точная штамповка гаек подшипников на автоматических линиях / Ю. И. Губин, В. Ф. Лысенко, Л. С. Телянко // Кузнечно-штамповочное производство. – 1989. – №3. – С. 9–10.
2. Штамповка поковок типа плоских колец и фланцев / Д. А. Ильинич, В. Г. Кондратенко, А. Н. Щеглов и др. // Кузнечно-штамповочное производство. – 1985. – №4. – С. 6–7.
3. Постолакый П.И. Безотходная штамповка деталей кольцевой формы / П.И. Постолакый, В.А. Тимошенко // Изв. вузов. Машиностроение. – 1982. – №11. – С. 138–142.
4. Пат. 68115 А Украина, МПК В21К21/00. Способ изготовления деталей со сквозным отверстием / Алиева Л. И., Савчинский И. Г., Лобанов А. И., Сивак К. И. – № 2003109157; заявл. 10.10.2003; опубл. 15.07.2004, Бюл. № 7.
5. Пат. 69057 U Украина, МПК В21К21/00. Способ изготовления деталей со сквозным отверстием / Алиев И. С., Алиева Л. И., Бондарева Е. Н. – № u 2011 09298; заявл. 24.07.2011; опубл. 25.04.2012, Бюл. № 8.

6. Пат. 73920 Украина, МПК В21К21/00. Способ изготовления деталей со сквозным отверстием / Алиев И. С., Алиева Л. И., Бондарева Е. Н. – № u 2012 04045; заявл. 02.04.2012; опубл. 10.10.2012, Бюл. № 19.
7. Огородников В.А. Оценка деформируемости металлов при обработке давлением / В.А. Огородников. – К.: Вища школа, 1983. – 175 с.

Bibliography (transliterated)

1. Gubin Yu. I. Tochnaya shtampovka gaeк podshipnikov na avtomaticheskikh liniyah / Yu. I. Gubin, V. F. Lyisenko, L. S. Temyanko // Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo. – 1989. – No3. – P. 9–10.
2. Shtampovka pokovok tipa ploskikh kolets i flantsev / D. A. Ilinich, V. G. Kondratenko, A. N. Scheglov i dr. // Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo. – 1985. – No4. – P. 6–7.
3. Postolakiy P.I. Bezothodnaya shtampovka detaley koltsevoy formy / P.I. Postolakiy, V.A. Timoshenko // Izv. vuzov. Mashinostroenie. – 1982. – No11. – P. 138–142.
4. Pat. 68115 A Ukraina, MPK V21K21/00. Sposob izgotovleniya detaley so skvoznyim otverstiem / Alieva L. I., Savchinskiy I. G., Lobanov A. I., Sivak K. I. – No 2003109157; yayavl. 10.10.2003; opubl. 15.07.2004, byul. No 7.
5. Pat. 69057 U Ukraina, MPK V21K21/00. Sposob izgotovleniya detaley so skvoznyim otverstiem / Aliev I. S., Alieva L. I., Bondareva E. N. – No u 2011 09298; yayavl. 24.07.2011; opubl. 25.04.2012, byul. No 8.
6. Pat. 73920 Ukraina, MPK V21K21/00. Sposob izgotovleniya detaley so skvoznyim otverstiem / Aliev I. S., Alieva L. I., Bondareva E. N. – No u 2012 04045; yayavl. 02.04.2012; opubl. 10.10.2012, byul. No 19.
7. Ogorodnikov V.A. Otsenka deformiruemosti metallov pri obrabotke davleniem / V.A. Ogorodnikov. – Kiev: Vischa shkola, 1983. – 175 p.

Поступила (received) 06.11.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Комбіноване видавлювання-поділ деталей типу кілець / Л. І. Алієва, Д. О. Картамішев, К. Д. Махмудов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 43 (1265). – С. 10–17. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2519-2671

Комбинированное выдавливание-разделение деталей типа колец / Л. И. Алиева, Д. А. Картамышев, К. Д. Махмудов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 43 (1265). – С. 10–17. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2519-2671

Combined extrusion-separation of parts type rings / L. I. Aliieva, D. O. Kartamyshev, K.D. Makhmudov // Bulletin of the NTU "KhPI". Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy. – Kh.: NTU "KhPI", 2017. – No. 43 (1265). – P. 10–17. – Bibliogr.: 7. – ISSN 2519-2671

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Алієва Л.І. – кандидат технічних наук, доцент, Донбаська державна машинобудівна академія (ДДМА), докторант кафедри ОМТ; e-mail: pnir@dgma.donetsk.ua.

Алиева Л.И. – кандидат технических наук, доцент, Донбасская государственная машиностроительная академия (ДГМА), докторант кафедры ОМД; e-mail: pnir@dgma.donetsk.ua.

Aliieva L.I. – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Donbass State Engineering Academy (DSEA), Associate Professor of the Department of OMD; e-mail: pnir@dgma.donetsk.ua.

Картамишев Д.О. – аспірант, Донбаська державна машинобудівна академія (ДДМА), аспірант кафедри ОМТ; e-mail: omd@dgma.donetsk.ua.

Картамышев Д.А. – аспірант, Донбасская государственная машиностроительная академия (ДГМА), аспірант кафедри ОМД; e-mail: omd@dgma.donetsk.ua.

Kartamyshev D.O. – Postgraduate Student, Donbass State Engineering Academy (DSEA), postgraduate student of the department of OMT; e-mail: omd@dgma.donetsk.ua.

Махмудов К.Д. – кандидат технічних наук, професор, Дагестанський державний технічний університет (ДГТУ), завідувач кафедри верстатів; e-mail: ktomp@list.ru.

Махмудов К.Д. – кандидат технических наук профессор, Дагестанский государственный технический университет (ДГТУ), заведующий кафедрой станков; e-mail: ktomp@list.ru

Makhmudov K.D. – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Professor, Daghestan State Technical University (DSTU), Head of the Department of Mashine Tools; e-mail: ktomp@list.ru.

УДК 621.923

Ф. В. НОВИКОВ, В. И. ПОЛЯНСКИЙ, С. А. ДИТИНЕНКО, А. Г. КРЮК

КОНЦЕПЦИИ ВЫСОКОТОЧНОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Сформулированы основные условия повышения эффективности механической обработки высокоточных деталей машин на основе применения прогрессивных методов высокоскоростного резания на современных станках с ЧПУ типа "обрабатывающий центр" и высокопроизводительных сборных конструкций инструментов с износостойкими покрытиями. Показана эффективность применения разработанной физико-математической теории процессов обработки материалов и технологии машиностроения, позволяющей с единых позиций производить теоретический анализ и оптимизационные расчеты технологических параметров лезвийной и абразивной обработки. Приведено новое теоретическое решение об определении технологических возможностей уменьшения погрешностей обработки при растачивании отверстий, обусловленных упругими перемещениями, возникающими в технологической системе. Даны практические рекомендации.

Ключевые слова: технология машиностроения, механическая обработка, высокоточные детали машин, производительность обработки, точность обработки, растачивание отверстия, упругие перемещения, технологическая система.

Сформульовано основні умови підвищення ефективності механічної обробки високоточних деталей машин на основі застосування прогресивних методів високошвидкісного різання на сучасних верстатах з ЧПУ типу "обробний центр" і високопродуктивних збірних конструкцій інструментів зі зносостійкими покриттями. Показано ефективність застосування розробленої фізико-математичної теорії процесів обробки матеріалів та технології машинобудування, яка дозволяє з єдиних позицій проводити теоретичний аналіз і оптимізаційні розрахунки технологічних параметрів лезової та абразивної обробки. Наведено нове теоретичне рішення про визначення технологічних можливостей зменшення похибок обробки при розточуванні отворів, обумовлених пружними переміщеннями, що виникають в технологічній системі. Надано практичні рекомендації.

Ключові слова: технологія машинобудування, механічна обробка, високоточні деталі машин, продуктивність обробки, точність обробки, розточування отвору, пружні переміщення, технологічна система.

The main conditions for increasing the efficiency of machining high-precision parts of machines based on the application of progressive high-speed cutting methods on modern CNC machines such as the "machining center" and high-performance prefabricated structures of tools with wear-resistant coatings are formulated. The efficiency of the application of the developed physical and mathematical theory of the processes of material processing and engineering technology is shown, which makes it possible to perform theoretical analysis and optimization calculations of technological parameters of blade and abrasive processing from single positions. A new theoretical decision is made to determine the technological possibilities of reducing processing errors during boring holes caused by elastic displacements arising in the technological system. It has been theoretically established that as the number of tool passes increases, the processing errors decrease quite intensively, according to the law of geometric progression. Therefore, from the point of view of increasing the accuracy of the hole size, it is advisable to remove the allowance in one or several passes of the tool, and from the point of view of increasing the alignment of the hole, on the contrary, it is necessary to increase the number of passes of the tool.

Keywords: engineering technology, machining, high-precision machine parts, processing capacity, machining accuracy, hole boring, elastic movements, technological system.

Введение. При изготовлении деталей машин из материалов с повышенными физико-механическими свойствами необходимо применение эффективных технологий механической обработки, позволяющих повысить качество, точность и производительность обработки. В особой мере это относится к механической обработке высокоточных деталей гидравлической аппаратуры, которые работают в условиях интенсивного трения и изнашивание и изготавливаются из разнообразных труднообрабатываемых материалов (высокопрочных сталей и сплавов, высокотвердых магнитных сплавов, пластичных цветных металлов и т.д.). К точности и качеству изготовления этих деталей предъявляются высокие требования: точность размера, формы и взаимного расположения поверхностей – 1...10 мкм, шероховатость поверхности – $R_a = 0,04...0,2$ мкм. Однако стабильно выполнить эти требования традиционными методами механической обработки сложно в связи с образованием разнообразных погрешностей обработки, температурных дефектов и отдельных рисок-царапин на обрабатываемых поверхностях. Для их устранения технологическими процессами предусмотрено выполнение большого числа дополнительных трудоемких финишных операций доводки, полирования и ручной обработки, которые значительно снижают эффективность изготовления деталей. Поэтому совершенствование

технологий финишной механической обработки является актуальной задачей, направленной на повышение конкурентоспособности машиностроительной продукции.

Анализ последних исследований и публикаций. В настоящее время накоплен значительный опыт механической обработки деталей машин для различных по обрабатываемости материалов. Получили широкое применение прогрессивные методы высокоскоростного резания на современных станках с ЧПУ типа "обрабатывающий центр" и высокопроизводительные сборные конструкции инструментов с износостойкими покрытиями. Усилиями многих поколений ученых сформированы основы теории резания материалов и проектирования металлорежущих инструментов и станков, разработаны нормативы режимов резания, получены решения ряда важных оптимизационных технологических задач и т.д. [1–3]. Вместе с тем, наука о резании материалов, как и 100 лет назад, основана на эмпирических знаниях, т.е. на результатах экспериментальных исследований и эмпирических зависимостях физических и технологических параметров обработки, которые справедливы лишь для "узких" диапазонов изменения режимов резания и не дают общих технологических решений. Достаточно строгой физико-

математической теории процесса резания нет. При этом известные решения разнородны, поскольку отсутствует единый подход к математическому описанию технологических процессов, отсутствует единая система уравнений (зависимостей), описывающих целевые функции и технические ограничения обработки. Несомненно, это сужает возможности оптимального проектирования технологических процессов, поскольку недостаточно теоретических знаний о технологических возможностях различных методов механической обработки. В итоге практика опережает теорию. Этим объясняется отсутствие мощных технологических решений, которые позволяют совершить своего рода прорыв в познаниях процесса резания и кардинально решить проблему повышения (в 10 раз и больше) технико-экономических показателей обработки. Достаточно отметить, что и в настоящее время отсутствуют научно обоснованные рекомендации по выбору оптимальных методов обработки при проектировании операционной технологии, не говоря о более сложном проектировании маршрутной технологии. В результате технолог подходить к проектированию операционно-маршрутной технологии (выбору наиболее эффективных методов обработки) чисто интуитивно, ссылаясь на свой собственный опыт, а не на научную теорию, что, несомненно, не отвечает требованиям рыночной экономики по созданию конкурентоспособной машиностроительной продукции.

Изложение основного материала. Все возрастающие требования к качеству и точности обрабатываемых поверхностей деталей, повышению производительности обработки определяют необходимость получения более общих технологических решений на основе создания фундаментальной физико-математической теории механической обработки. В особой мере это относится к финишным операциям, которые наиболее ответственны за окончательное формирование параметров точности, качества и эксплуатационных свойств обрабатываемых поверхностей деталей машин.

Это чрезвычайно важно именно сейчас, когда на предприятия поступают современные высокооборотные станки с ЧПУ и компьютерная техника, с помощью которой можно автоматизировать проектные работы, выбирать оптимальные варианты операционно-маршрутной технологии на основе количественных расчетов. Для этого необходима эффективная практическая формализованная теория технологии машиностроения, механической и физико-технической обработки, доведенная до уровня инженерных формул. Это позволит с единых позиций произвести оптимизацию параметров лезвийной и абразивной обработки и получить оптимальные технологические решения, обеспечивающие выбор наиболее эффективных методов обработки в широких диапазонах изменения технологических параметров. Это также позволит научно обоснованно подойти к

раскрытию (уточнению) физической сущности процессов обработки и установлению их технологических возможностей с точки зрения повышения производительности, точности и качества обработки, а также теоретическому обобщению основных результатов обработки, достигнутых разными методами обработки.

В связи с этим авторами разработана физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения [4–6], которая, в отличие от известных теорий, позволяет с единых позиций аналитически описать основные технологические параметры обработки, на качественно новом фундаментальном уровне раскрыть физические закономерности разных методов механической обработки и обосновать их технологические возможности. Причем, все теоретические решения доводятся до простых инженерных формул, которые можно использовать как в научных целях, так и для решения конкретных практических задач непосредственно в заводских условиях. Это открывает широкие перспективы решения оптимизационных технологических задач направленного выбора наиболее эффективных методов механической обработки при проектировании технологических процессов и особенно операций финишной обработки, когда необходимо обеспечить высокие требования по точности и качеству обрабатываемых поверхностей и одновременно снизить трудоемкость обработки.

Поэтому на основе данной теории решена важная научно-практическая проблема повышения точности, качества и производительности обработки ответственных высокоточных деталей путем разработки и внедрения высокоэффективных технологий механической обработки с использованием современных высокооборотных станков с ЧПУ, прогрессивных конструкций лезвийных и абразивных инструментов и новых кинематических схем высокоскоростной обработки. Это позволило перевести обработку ряда сложных деталей гидравлической аппаратуры на новые более эффективные технологии, т.е., по сути, провести техническое перевооружение предприятий и выйти на качественно новый уровень производства.

Суть разработанной физико-математической теории процессов обработки материалов и технологии машиностроения заключается в математическом представлении с единых позиций основных закономерностей силовой и тепловой напряженности механической обработки с учетом такого важнейшего параметра как энергоемкость обработки. Для этого разработаны математические модели определения сил и температуры резания, упругих перемещений, которые возникают в технологической системе и в большинстве случаев определяют точность механической обработки. Аналитически описаны закономерности формообразования поверхностей и съема материала при лезвийной и абразивной обработках. В результате получены расчетные зависимости для определения

основных параметров шероховатости обработанных поверхностей и обоснованы условия их уменьшения. Решены оптимизационные технологические задачи с использованием критериев наибольшей производительности и наименьшей себестоимости обработки. Теоретически определены условия обработки, которые исключают образование на обрабатываемых поверхностях прижогов, микротрещин и других температурных дефектов. Определена максимально возможная производительность обработки и оптимальные режимы резания с учетом ограничений по точности, шероховатости и качеству обрабатываемых поверхностей. В результате появилась возможность направленного выбора эффективных методов обработки и осуществления обоснованного перехода на финишных операциях, например, от абразивного шлифования к лезвийной обработке или от процессов резания к процессам пластического деформирования обрабатываемых материалов и т.д. На основе полученных теоретических решений произведена разработка и выбор оптимальных схем обработки, которые внедрены на ряде операций финишной механической обработки деталей гидравлической аппаратуры и обеспечивают их высококачественную бездефектную обработку.

В теории большое внимание уделено разработке технологий изготовления высокоточных отверстий в деталях гидравлической аппаратуры, поскольку их удельный вес в общем технологическом цикле обработки значителен и составляет 50 % и более. Так, предложено при финишной обработке отверстий использовать прогрессивный метод высокоскоростного фрезерования концевыми фрезами, который обеспечивает высокопроизводительную и высокоточную бездефектную обработку и является чрезвычайно перспективным направлением в механической обработке.

Как показывает практика, применение разработанных технологий механической обработки и современных высокооборотных станков с ЧПУ позволяет резко сократить трудоемкость прецизионной обработки сложных деталей гидравлической аппаратуры (изготовленных из высокопрочных сплавов и сталей). Так, при изготовлении сложных корпусных деталей, которые раньше требовали, например, до 200 операций механической обработки (особенно финишной обработки), за счет применения новых технологий и современного оборудования количество операций сократилось до 2 раз. Это позволило существенно снизить трудоемкость обработки деталей при обеспечении необходимых показателей точности и качества.

В качестве примера приведено новое теоретическое решение об определении технологических возможностей уменьшения погрешностей обработки при растачивании отверстий, обусловленных упругими

перемещениями, возникающими в технологической системе.

Так, величина упругого перемещения y , возникающего в технологической системе при первом проходе инструмента, определяется зависимостью [7]:

$$y = \frac{t}{1 + \frac{c \cdot K_{pez}}{\sigma \cdot S}}, \quad (1)$$

где t – глубина резания, м;

c – жесткость технологической системы, Н/м;

S – подача, м/об.;

σ – условное напряжение резания, Н/м²;

$K_{pez} = P_z / P_y$;

P_y, P_z – соответственно радиальная и тангенциальная составляющие силы резания, Н.

Уменьшить величину y можно уменьшением параметров σ, S, t и увеличением c и K_{pez} . Очевидно, уменьшение подачи S и глубины резания t ведет к снижению производительности обработки, что неэффективно. Поэтому целесообразно уменьшать отношение σ / K_{pez} (которое определяет, по сути, энергоемкость обработки) и увеличивать жесткость технологической системы c .

Уменьшить отношение σ / K_{pez} можно повышением режущей способности инструмента (применением более твердых и износостойких инструментальных материалов, а также износостойких покрытий инструментов) и снижением интенсивности трения в зоне резания.

При условии $\frac{c \cdot K_{pez}}{\sigma \cdot S} > 1$ зависимость (1)

принимает упрощенный вид:

$$y = \frac{\sigma \cdot Q}{c \cdot K_{pez} \cdot V}, \quad (2)$$

где $Q = S \cdot t \cdot V$ – производительность обработки, м³/с;

V – скорость резания, м/с.

Как следует из зависимости (2), увеличить производительность обработки Q при заданной погрешности обработки, обусловленной величиной упругого перемещения y , можно в первую очередь за счет увеличения скорости резания V , т.е. переходом в область высокоскоростного резания. При этом также эффективно уменьшать отношение σ / K_{pez} и увеличивать жесткость технологической системы c .

При условии $\frac{c \cdot K_{pez}}{\sigma \cdot S} < 1$ фактически

справедливо соотношение $y \approx t$. В этом случае сьем металла практически отсутствует, а в технологической системе образуются упругие перемещения, соизмеримые с глубиной резания. Это связано с низкой жесткостью технологической системы c или со значительным затуплением

інструмента і відповідно збільшенням відношення σ / K_{pez} . В результаті відбувається свого роду копіювання вихідної погрешності оброблюваної поверхності, т.е. вихідна погрешність обробки отворів не усувається.

В цьому випадку величина пружного переміщення y визначає точність розміра оброблюваної поверхності: чим менше y , тим вона вище. Наряду з забезпеченням точності розміра оброблюваної поверхності, при обробці отворів важливо виконати вимоги по точності форми оброблюваної поверхності. Тому представляє інтерес аналітичне визначення погрешності обробки отворів у вигляді її несоосності, яка є одним з основних параметрів точності обробки отворів (рис. 1 [8]).

Припустимо, що вихідна несоосність оброблюваного отвору дорівнює величині Δ_0 (відстані між центром вихідної окружності отвору O_0 і положенням осі інструмента до обробки O_1). Тоді величини пружних переміщень y_1 і y_2 , які виникають в технологічній системі в моменти різання з найбільшою $(t + \Delta_0)$ і найменшою $(t - \Delta_0)$ глибинами різання, визначаються:

$$y_1 = \frac{(t + \Delta_0)}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{pez}}{\sigma \cdot S}\right)}; \quad (3)$$

$$y_2 = \frac{(t - \Delta_0)}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{pez}}{\sigma \cdot S}\right)}, \quad (4)$$

де $t = (D - d) / 2$;

d , D – відповідно, діаметри обробленого і оброблюваного отворів, м.

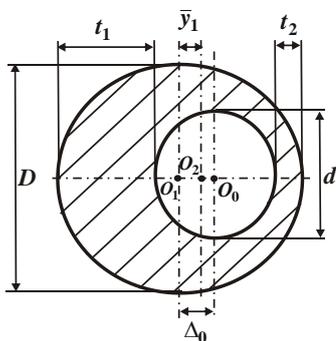


Рис. 1 – Расчетная схема определения несоосности обрабатываемого отверстия при растачивании

Несоосность обрабатываемого отверстия, которая равна расстоянию между положениями осей инструмента до обработки O_1 и при его первом проходе O_2 , определится:

$$\bar{y}_1 = y_1 - y_2 = \frac{2 \cdot \Delta_0}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{pez}}{\sigma \cdot S}\right)}. \quad (5)$$

Из зависимости (5) следует, что основным путем уменьшения величины \bar{y}_1 является уменьшение Δ_0 . Остальные параметры, которые входят в зависимость (5), влияют на величину \bar{y}_1 так же, как и на величину пружного перемещения y в зависимости (1). Поэтому закономерности формирования величин y и \bar{y}_1 одни и те же. Отличие состоит лишь в количественных значениях глубины резания t и величины $2\Delta_0$, которые входят в зависимости (1) и (5). При условии $t > 2\Delta_0$ точность обработки отверстия обусловлена точностью размера, а при условии $t < 2\Delta_0$, наоборот, точностью формы обрабатываемого отверстия.

Необходимо определить, насколько уменьшится несоосность отверстия при втором проходе инструмента. В этом случае наибольшая и наименьшая глубины резания соответственно выражаются: $(t + y_1)$ и $(t + y_2)$, где y_1 , y_2 – величины пружных перемещений, которые возникают в технологической системе и определяются зависимостями (3) и (4). Тогда несоосность обрабатываемого отверстия при втором проходе инструмента определится зависимостью, аналогичной зависимости (5):

$$\begin{aligned} \bar{y}_2 &= \frac{(t + y_1)}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{pez}}{\sigma \cdot S}\right)} - \frac{(t + y_2)}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{pez}}{\sigma \cdot S}\right)} = \\ &= \frac{\bar{y}_1}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{pez}}{\sigma \cdot S}\right)} = \frac{2 \cdot \Delta_0}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{pez}}{\sigma \cdot S}\right)^2}. \end{aligned} \quad (6)$$

Сравнивая зависимости (5) и (6) видно, что величина \bar{y}_2 всегда меньше величины \bar{y}_1 , поскольку знаменатель зависимости (6) больше знаменателя зависимости (5). Следовательно, увеличение количества проходов инструмента приводит к уменьшению несоосности обрабатываемого отверстия.

Аналогично зависимости (6), можно определить несоосность обрабатываемого отверстия, т.е. величину \bar{y}_n после n -го прохода инструмента:

$$\bar{y}_n = \frac{2 \cdot \Delta_0}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{pez}}{\sigma \cdot S}\right)^n}. \quad (7)$$

Из зависимости (7) вытекает, что величина \bar{y}_n с увеличением количества проходов инструмента n уменьшается по закону геометрической прогрессии, т.е. довольно интенсивно. Поэтому заданную величину \bar{y}_n можно достичь за относительно

небольшое количество проходов инструмента.

Однако это справедливо при условии $\frac{c \cdot K_{рез}}{\sigma \cdot S} > 1$. При

условии $\frac{c \cdot K_{рез}}{\sigma \cdot S} < 1$ добиться снижения несоосности

отверстия с увеличением количества проходов инструмента n значительно сложнее, так как съём металла фактически отсутствует и исправление погрешности формы отверстия не происходит – имеет место копирование исходной погрешности обработки.

Необходимо отметить, что зависимость (7) не содержит глубину шлифования t , следовательно, с одинаковой эффективностью обработку можно выполнять как по схеме выхаживания, т.е. без поперечной подачи, так и по схеме обработки с поперечной подачей. Однако во втором случае обеспечивается высокопроизводительный съём металла, что предполагает широкое практическое использование схемы обработки с поперечной подачей.

Необходимо отметить, что величина упругого перемещения y (которая определяет точность размера обрабатываемого отверстия) с увеличением количества проходов инструмента n , как показано в работе [4], непрерывно увеличивается, асимптотически приближаясь к определённому значению. Поэтому с точки зрения повышения точности размера обрабатываемого отверстия целесообразно съём припуска осуществлять за один или несколько проходов инструмента, а с точки зрения повышения соосности отверстия, наоборот, необходимо увеличивать количество проходов инструмента n .

Выводы. В работе сформулированы основные условия повышения эффективности механической обработки высокоточных деталей машин на основе применения прогрессивных методов высокоскоростного резания на современных станках с ЧПУ типа “обрабатывающий центр” и высокопроизводительных сборных конструкций режущих инструментов с износостойкими покрытиями. Показана эффективность применения разработанной физико-математической теории процессов обработки материалов и технологии машиностроения, которая позволяет с единых позиций производить теоретический анализ и оптимизационные расчёты технологических параметров лезвийной и абразивной обработки. Приведено новое теоретическое решение об определении технологических возможностей уменьшения погрешностей обработки при растачивании отверстий, обусловленных упругими перемещениями, возникающими в технологической системе. Теоретически установлено, что с увеличением количества проходов инструмента погрешности обработки уменьшаются довольно интенсивно – по закону геометрической прогрессии. Поэтому с точки зрения повышения точности размера

обрабатываемого отверстия целесообразно съём припуска осуществлять за один или несколько проходов инструмента, а с точки зрения повышения соосности отверстия, наоборот, необходимо увеличивать количество проходов инструмента.

Список литературы

1. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов / В.Ф. Бобров. – М.: Машиностроение, 1975. – 343 с.
2. Маталин А.А. Точность механической обработки и проектирование технологических процессов / А.А. Маталин. – М.: Машиностроение, 1970. – 390 с.
3. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х томах: Т.1 / Под редакцией А.Г. Косиловой и Р.К. Мецержякова. – 4-е издание, перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1985. – 656 с.
4. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В 10 т. – Т. 1. “Механика резания материалов” – Одесса: ОНПУ, 2002. – 580 с.
5. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общей редакцией Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В 10 т. – Т.7. “Точность обработки деталей машин”. – Одесса: ОНПУ, 2004. – 546 с.
6. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В 10 т. – Т. 10. «Концепции развития технологии машиностроения». – Одесса: ОНПУ, 2005. – 565 с.
7. Полянський В. І. Технологічне забезпечення якості та продуктивності механічної обробки отворів в деталях гідроапаратури: автореф. дис. ... кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.08 – технологія машинобудування / В.І. Полянський. – Маріуполь: ДВНЗ “Приазовський державний технічний університет”, 2012. – 21 с.
8. Іванов І. Є. Технологічне забезпечення точності і стабільності виготовлення різьбових отворів у балонах в умовах масового виробництва: автореф. дис. ... кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.08 – технологія машинобудування / І.Є. Іванов. – Маріуполь: Приазовський державний технічний університет, 2008. – 21 с.

Bibliography (transliterated)

1. Bobrov V.F. Osnovy teorii rezaniya metallov / V.F. Bobrov. – Moscow: Mashinostroyeniye, 1975. – 343 p.
2. Matalin A.A. Tochnost' mekhanicheskoy obrabotki i proyektirovaniye tekhnologicheskikh protsessov / A.A. Matalin. – Moscow: Mashinostroyeniye, 1970. – 390 p.
3. Spravochnik tekhnologa-mashinostroitel'ya. V 2 t.: Vol. 1 / pod redaktsiyev A.G. Kosilovoy i R.K. Meshcheryakova. – 4-ve izdaniye, pererab. i dop. – Moscow: Mashinostroyeniye, 1985. – 656 p.
4. Fiziko-matematicheskaya teoriya protsessov obrabotki materialov i tekhnologii mashinostroyeniya / Pod obshch. red. F.V. Novikova i A.V. Yakimova. V 10 t. – Vol. 1. “Mekhanika rezaniya materialov” – Odessa: ONPU, 2002. – 580 p.
5. Fiziko-matematicheskaya teoriya protsessov obrabotki materialov i tekhnologii mashinostroyeniya / Pod obshchey redaktsiyev F.V. Novikova i A.V. Yakimova. V 10 t. – Vol. 7. “Tochnost' obrabotki detaley mashin”. – Odessa: ONPU, 2004. – 546 p.
6. Fiziko-matematicheskaya teoriya protsessov obrabotki materialov i tekhnologii mashinostroyeniya / Pod obshch. red. F.V. Novikova i A.V. Yakimova. V 10 t. – Vol. 10. “Kontseptsii razvitiya tekhnologii mashinostroyeniya”. – Odessa: ONPU, 2005. – 565 p.
7. Polyans'kiy V. I. Tekhnologichne zabezpechnnya yakosti ta produktivnosti mekhanichnoy obrobki otvoriv v detalyakh gidroaparatury: avtoref. dis. ... kandidata tekhnichnikh nauk za spetsial'nistvu 05.02.08 – tekhnologiya mashinobuduvannya / V. I. Polyans'kiy. – Mariupol': DVNZ “Priazov'skiy derzhavniy tekhnichniy universitet”, 2012. – 21 p.
8. Ivanov I. E. Tekhnologichne zabezpechnnya tochnosti i stabil'nosti виготовлення різьбових отворів у балонах в умовах масового виробництва: автореф. дис. ... кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.08 – технологія машинобудування / І. Є. Іванов. – Маріуполь: Приазовський державний технічний університет, 2008. – 21 p.

Поступила (received) 26.10.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Концепції високоточної механічної обробки деталей машин / Ф. В. Новіков, В. І. Полянський, С. О. Дитиненко, А. Г. Крюк // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 43 (1265). – С. 18–23. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2519-2671

Концепции высокоточной механической обработки деталей машин / Ф. В. Новиков, В. И. Полянский, С. А. Дитиненко, А. Г. Крюк // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 43 (1265). – С. 18–23. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2519-2671

The concept of high-precision machining of machine parts / F. V. Novikov, V. I. Polyansky, S. A. Ditinenko, A. G. Kriuk // Bulletin of the NTU "KhPI". Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy. – Kh.: NTU "KhPI", 2017. – No. 43 (1265). – P. 18–23. – Bibliogr.: 8. – ISSN 2519-2671

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

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

Новиков Федор Васильевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Природоохранные технологии, экология и безопасность жизнедеятельности» Харьковского национального экономического университета имени Семена Кузнеця, г. Харьков; тел.: (0572) 69-55-62; e-mail: fokusnic1@rambler.ru

Novikov Fedor Vasilivych – Doctor of Technical Sciences Professor of the Department "Environmental technologies, ecology and life safety" Kharkiv National Economic University named after Semen Kuznets, Kharkiv; tel.: (0572) 69-55-62; e-mail: fokusnic1@rambler.ru

Полянський Володимир Іванович – кандидат технічних наук, Генеральний директор, ТОВ «Імперія металів», м. Харків; тел.: +38-0675780906; e-mail: tools@imperija.com

Полянський Владимир Иванович – кандидат технических наук, Генеральный директор, ООО «Империя металлов», г. Харьков; тел.: +38-0675780906; e-mail: tools@imperija.com

Polyansky Vladimir Ivanovich – Candidate of Technical Sciences, General Director of LLC "Empire Metals", Kharkov; tel.: +38-0675780906; e-mail: tools@imperija.com

Дитиненко Станіслав Олександрович – кандидат технічних наук, доцент кафедри «Природоохоронні технології, екологія та безпека життєдіяльності» Харківського національного економічного університету імені Семена Кузнеця, м. Харків; тел.: +38-0678924575; e-mail: fokusnic1@rambler.ru

Дитиненко Станислав Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Природоохранные технологии, экология и безопасность жизнедеятельности» Харьковского национального экономического университета имени Семена Кузнеця, г. Харьков; тел.: +38-0678924575; e-mail: fokusnic1@rambler.ru

Ditinenko Stanislav Aleksandrovich – candidate of technical sciences (PhD), associate professor of "Environmental technologies, ecology and life safety" of the Semen Kuznets Kharkiv National University of Economics, Kharkiv, tel. +38-0678924575; e-mail: fokusnic1@rambler.ru

Крюк Анатолій Григорович – кандидат технічних наук, професор кафедри «Природоохранные технологии, экология и безопасность жизнедеятельности» Харьковского национального экономического университета, г. Харьков. тел.: +38-0665936393; e-mail: fokusnic1@rambler.ru

Крюк Анатолий Григорович – кандидат технических наук, профессор кафедры «Природоохоронні технології, екологія та безпека життєдіяльності» Харківського національного економічного університету імені Семена Кузнеця, м. Харків; тел.: +38-0665936393; e-mail: fokusnic1@rambler.ru

Kryuk Anatoly Grykorievich – candidate of technical sciences, professor of the department "Environmental technologies, ecology and life safety" of the Semen Kuznets Kharkiv National University of Economics, Kharkiv; tel.: +38-0665936393; e-mail: fokusnic1@rambler.ru

УДК 621.771.63

С. Ю. ПЛЕСНЕЦОВ

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ШИРИНЫ ИСХОДНОЙ ЗАГОТОВКИ ДЛЯ СПЕЦИАЛЬНЫХ ГНУТЫХ ПРОФИЛЕЙ С ЭЛЕМЕНТАМИ ДВОЙНОЙ ТОЛЩИНЫ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ И КОНТРОЛЕ

В Украине производство металлоконструкций из гнутых профилей с элементами двойной толщины развито достаточно широко, однако в литературе отсутствуют методики, позволяющие обеспечить точный расчет ширины исходной заготовки, а также спрогнозировать реальную ширину готового гнутого профиля, в связи с чем, освоение новых профилей с элементами двойной толщины и подбор ширины исходной заготовки обеспечивается пробным профилированием. В работе выполнены исследования изменения толщины металла при его изгибе в диапазоне углов подгибки $\alpha=90\dots180^\circ$, разработана уточненная методика расчета ширины исходной заготовки для профилей с элементами двойной толщины, разработаны рекомендации по оценке технологичности новых профилей с элементами двойной толщины и прогнозированию конечных размеров профилей с элементами двойной толщины, что важно для их использования в замковых элементах. Проведены экспериментальные исследования места изгиба на 180° , на основании которых разработаны зависимости для уточненного расчета ширины исходной заготовки и готовых профилей, подлежащих освоению. Выработаны практические рекомендации для применения предложенной модели в конструкторской документации, для повышения технологичности изготовления гнутых профилей с элементами двойной толщины.

Ключевые слова: профиль гнутый, элемент двойной толщины, исследования экспериментальные, место изгиба, методика расчета, рекомендации практические.

В Україні виробництво металлоконструкцій з гнутих профілів з елементами подвійної товщини розвинене досить широко, однак в літературі [1, 2] відсутні методики, що дозволяють забезпечити точний розрахунок ширини вихідної заготовки, а також спрогнозувати реальну ширину готового гнутого профілю, в зв'язку з чим, освоєння нових профілів з елементами подвійної товщини і підбір ширини вихідної заготовки забезпечується пробним профилюванням. В роботі виконані дослідження зміни товщини металу при його згині в діапазоні кутів підгинання $\alpha=90\dots180^\circ$, розроблена уточнена методика розрахунку ширини вихідної заготовки для профілів з елементами подвійної товщини, розроблені рекомендації по оцінці технологічності нових профілів з елементами подвійної товщини і прогнозування кінцевих розмірів профілів з елементами подвійної товщини, що важливо для їх використання в замкових елементах. Проведено експериментальні дослідження місця згину на 180° , на підставі яких розроблені залежності для уточненого розрахунку ширини вихідної заготовки і готових профілів, що підлягають освоєнню. Вироблені практичні рекомендації для застосування запропонованої моделі в конструкторській документації, для підвищення технологічності виготовлення гнутих профілів з елементами подвійної товщини.

Ключові слова: профіль гнутий, елемент подвійної товщини, дослідження експериментальні, місце згину, методика розрахунку, рекомендації практичні.

In Ukraine, the production of metal structures from bent profiles with elements of double thickness is developed quite widely, however, there are no methods in the literature that allow accurate calculation of the width of the initial billet, as well as predict the actual width of the finished bent profile, and, therefore, the development of new profiles with elements of double thickness and selection of the width of the initial workpiece is provided by trial profiling. In the work, studies were made of the change in the thickness of the metal during its bending in the range of angles of the bend $\alpha = 90\dots180^\circ$, an improved method for calculating the width of the initial billet for profiles with double-thickness elements was developed, recommendations were developed to assess the processability of new profiles with elements of double thickness and forecasting the final dimensions of the profiles with elements of double thickness, which is important for their use in the locking elements. Experimental studies of the bend point for 180° have been carried out, on the basis of which dependences have been developed for a more accurate calculation of the width of the initial billet and the finished profiles to be developed. Practical recommendations for the application of the proposed model in the design documentation, for increasing the manufacturability of the manufacture of bent profiles with elements of double thickness, have been worked out.

Keywords: bent profile, double thickness element, experimental studies, bending point, calculation technique, practical recommendations.

Актуальность исследований. В Украине производство металлоконструкций из гнутых профилей с элементами двойной толщины развито достаточно широко, однако в литературе отсутствуют методики, позволяющие обеспечить точный расчет ширины исходной заготовки, а также спрогнозировать реальную ширину готового гнутого профиля, в связи с чем, освоение новых профилей с элементами двойной толщины и подбор ширины исходной заготовки обеспечивается пробным профилированием. Учитывая изложенное, работа, направленная на создание уточненной методики расчета ширины исходной заготовки для гнутых профилей с элементами двойной толщины, является важной и актуальной.

Цель работы: создание уточненной методики расчета ширины места изгиба исходной заготовки для элементов двойной толщины.

Для достижения поставленной цели в работе поставлены и решены следующие задачи:

– выполнены исследования изменения толщины металла при его изгибе в диапазоне углов подгибки $\alpha=90\dots180^\circ$;

– разработана уточненная методика расчета ширины исходной заготовки для профилей с элементами двойной толщины;

– разработаны рекомендации по оценке технологичности новых профилей с элементами двойной толщины, подлежащих освоению;

– разработаны рекомендации по прогнозированию конечных размеров готовых профилей с элементами двойной толщины, что важно для их использования в замковых элементах.

Основные результаты исследований.

1. Исследование изменения толщины при $S=0.8-1.8$ мм и $\alpha=90\dots180^\circ$. Для проведения исследования были отобраны образцы из стали Ст. 3 и стали 08 кп. Исходные заготовки 10×50 мм толщиной 0,8 мм, 1,5 мм и 1,8 мм после маркировки были просканированы поочередно. Подгибка образцов производилась последовательно на 90° , 120° и 180° на гидравлическом испытательном прессе УИМ-50

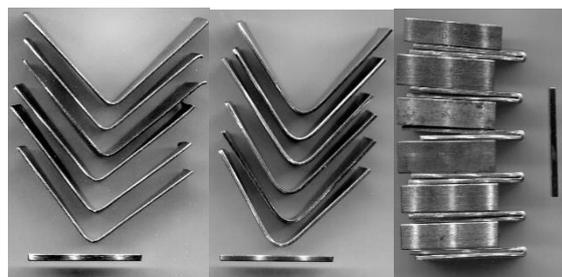
усилием 50 т со сканированием каждой серии образцов [3-15]. Для подгибки использовался гибочный штамп с соответствующими углам подгибки сменными пуансонами и матрицами.

Подгибка экспериментальных образцов на 120° и 180° представлена на рис. 1. На рис. 2 приведены отсканированные образцы толщиной $S=0,8$ мм; 1,5 мм; 1,8 мм, после гибки (А–90°; В–120°; С–180°), соответственно.



а б

Рис. 1 – Гидравлический пресс с установленным гибочным штампом: а – для изгиба на 90°; б – для изгиба на 120°



а б в

Рис. 2 – Отсканированные образцы после подгибки: а – на 90° ($S=0,8$ мм); б – на 120° ($S=1,5$ мм); в – на 180° (получено место изгиба двойной толщины $S=1,8$ мм)

С помощью программного комплекса НТУ «ХПИ» *Farseer v.1.4.25* [6, 8] проведены замеры и построены графики зависимости «утонения-утолщения» от угла подгибки. Из графиков видно, что с изменением угла подгибки изменяется также и толщина металла. На рис. 3, рис. 4 и рис. 5 показаны изменения толщины металла от угла подгибки для $S=0,8$; $S=1,5$; $S=1,8$ мм, из которых следует, что при формообразовании угла до 120° происходит утонение металла в месте изгиба, при дальнейшей подгибке до 180° – утолщение.

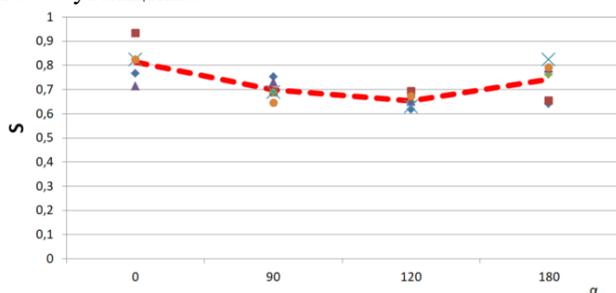


Рис. 3 – График изменения толщины «утонение-утолщение» в зависимости от угла подгибки при $S=0,8$ мм

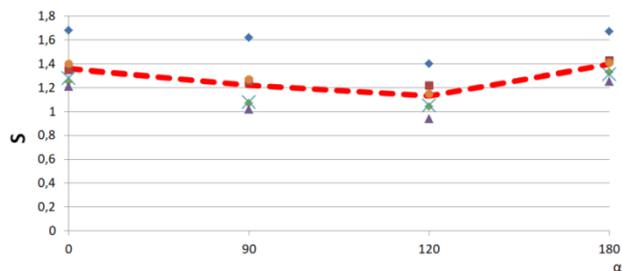


Рис. 4 – График изменения толщины «утонение-утолщение» в зависимости от угла подгибки при $S=1,5$ мм

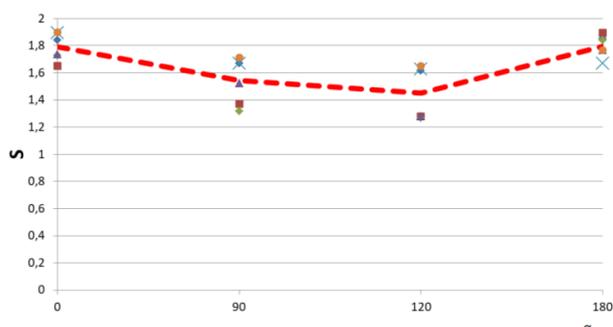


Рис. 5 – График изменения толщины «утонение-утолщение» в зависимости от угла подгибки при $S=1,8$ мм

По результатам экспериментальных исследований построен обобщенный график изменения толщины места изгиба в зависимости от угла подгибки (рис. 6).

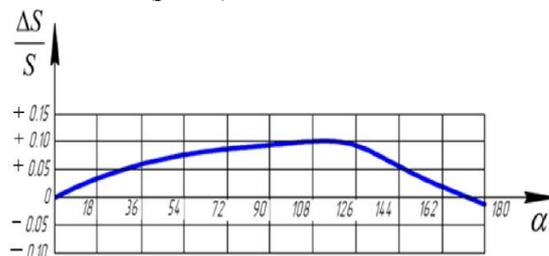


Рис. 6 – Обобщенный график зависимости изменения толщины от угла подгибки и отношения максимального утонения к толщине полосы $\left(\frac{\Delta S}{S}\right)$

Из анализа графика, представленного на рис. 6, следует, что при подгибке до 120° происходит утонение металла, которое не превышает 0,10 мм. Дальнейшее формоизменение (подгибка до 180°) приводит к утолщению металла в месте изгиба (увеличению толщины на 0,03 мм), что значительно влияет, как на расчет исходной заготовки, так и на калибровку валков. Полученный график с достаточной точностью аппроксимируется зависимостью:

$$\frac{\Delta S}{S} = k \cdot \sin \frac{\alpha}{2}, \quad (1)$$

где $k = 0,045$ – коэффициент, учитывающий деформированное состояние металла.

Наружная поверхность металла в месте изгиба, может быть описана кругом с радиусом R (рис. 7).

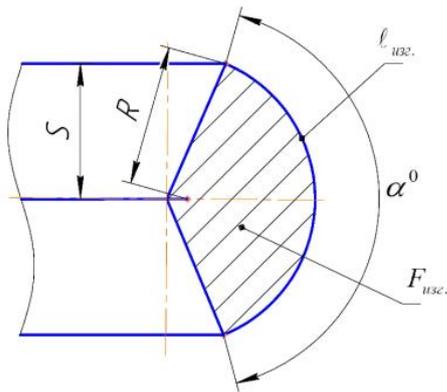


Рис. 7 – Очаг деформации места изгиба на 180°

Площадь сектора определяется по общеизвестной зависимости:

$$F_{изг.} = \frac{R^2}{2} \left(\pi \frac{\alpha}{180} - \sin \alpha \right), \quad (2)$$

где R – радиус наружной поверхности места изгиба;
 α – угол сектора места изгиба.

По формуле (2) получено численное значение деформируемой площади места изгиба, для элемента двойной толщины при $S=1,75$ мм, $R=2,05$ мм, $\alpha=151^\circ$, мм²:

$$F_{изг.} = \frac{2,05}{2} \left[3,14 \frac{151}{180} - \sin(151) \right] = 5,05.$$

Зная размеры плоских участков, находим площадь металла исходной заготовки, которая соответствует участку, который вошел в место изгиба. На рис. 8 показана расчетная схема исходной и конечной заготовок.

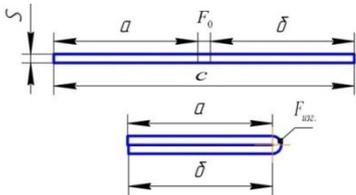


Рис. 8 – Чертеж исходной заготовки с обозначенными размерами плоских участков гнутого профиля

Найдем F_0 (при расчетной длине места изгиба l_0 толщине $S=1,75$ мм), мм²:

$$l_0 = c - (a + \delta) = 67,75 - (35,57 + 32,36) = 2,6 \text{ мм}; \quad (3)$$

$$F_0 = l_0 S = 2,6 \cdot 1,75 = 4,68. \quad (4)$$

С использованием закона постоянства объема определяем ширину места изгиба двойной толщины, для чего приравниваем найденные площади плоского участка и места изгиба:

$$F_{изг.} \approx F_0 \rightarrow 5,05 \approx 4,68. \quad (5)$$

Расчетные значения, полученные по формулам (4) и (5), показывают, что расхождение составляет 0,37 мм² (10%), что приемлемо для инженерных расчетов.

Экспериментальная длина ($l_{экс}$) в данном случае равна:

$$l_{экс} = \frac{F_{изг.}}{S} = \frac{4,61}{1,75} = 2,63. \quad (6)$$

Определим погрешность расчетов ширины исходной заготовки:

$$\Delta = \frac{l_{экс.} - l_0}{l_{экс.}} \cdot 100\% = \frac{2,63 - 2,6}{2,63} \cdot 100\% = 1,51\%, \quad (7)$$

где $l_{экс}$ – экспериментально рассчитанная длина места изгиба,

l_0 – расчетная длина места изгиба.

Полученные экспериментальные результаты для всего диапазона толщин и дальнейшего их анализа по данной методике сведены в табл. 1.

Таблица 1 – Результаты расчетов основных параметров по приведенной методике

S, мм	R, мм	α^0	$F_{изг.}$, мм ²	F_0 , мм ²	$l_{экс.}$, мм	l_0 , мм	Δ , %
0,8	1,1	130	0,9	0,88	1,13	1,1	2,65
1,5	1,75	140	3,55	3,45	2,37	2,28	2,95
1,8	2,05	150	5,05	4,68	2,63	2,6	1,51

Из табл. 1 следует, что максимальная погрешность Δ определения ширины места изгиба двойной толщины для расчета исходной заготовки не превышает 3%, что позволяет рекомендовать разработанную методику для инженерных расчетов.

2. Практические рекомендации по разработке технологии производства профилей с отбортовками

Результаты исследований формообразования гнутых профилей с отбортовками позволяют:

- уточнить методику расчета ширины исходной заготовки;
- оценивать технологичность новых профилей, подлежащих освоению;
- прогнозировать конечные размеры готовых профилей, что важно для их использования в замковых элементах.

3. Уточненная методика расчета ширины исходной заготовки.

Уточненная зависимость для расчета ширины исходной заготовки (рис. 9) может быть представлена следующим образом:

$$B_{проф.}^{конст} = \sum_{i=1}^n B_{плоск.} + \sum_{j=1}^m B_{90^0} + \sum_{\delta=1}^k B_{180^0}, \quad (8)$$

где $B_{плоск.}$ – ширина плоских участков принимается по чертежу профиля;

B_{90^0} – ширина мест изгиба на 90° определяется по общеизвестной методике;

B_{180^0} – ширина мест изгиба двойной толщины на 180°, определяется по полученной в работе зависимости:

$$B_{180^0} = \frac{\pi \alpha S}{180^0}, \quad (9)$$

где S – толщина металла;

α – угол сектора (см. рис. 1, рис. 3).

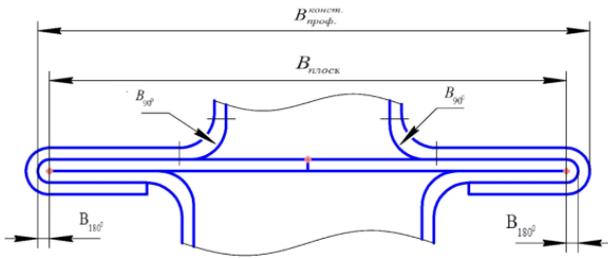


Рис. 9 – Сборная подвесная система металлоконструкции с применением гнутых профилей с элементами двойной толщины

4. Прогнозирование конечных размеров изготовленных профилей

Чертежи деталей с элементами двойной толщины в настоящее время оформляются в соответствии с подходом, приведенном на рис. 10.

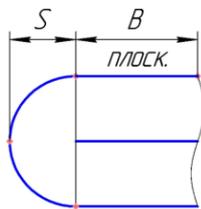


Рис. 10 – Элемент двойной толщины, используемый в конструкторской документации

В данном случае не учитывается реальная конфигурация места изгиба и фактический размер элемента двойной толщины на готовом профиле, в результате чего, при сборке гнутых профилей в замковые элементы могут возникать проблемы с обеспечением требующихся посадок.

Используемая в настоящее время формула для определения ширины готового профиля с местом двойной толщины (рис. 11) имеет следующий вид:

$$B = B_{\text{плоск.}} + 2S. \quad (10)$$

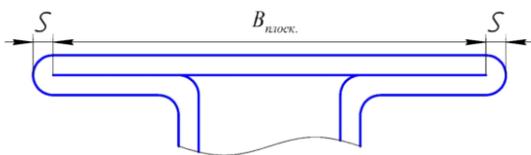


Рис. 11 – Конструкторское решение определения ширины готового профиля в используемой документации

Полученная в работе формула (4), может быть использована для уточненного расчета ширины готового профиля с элементами изгиба двойной толщины (см. рис. 12), которую можно представить в виде:

$$\Delta S = S \cdot k \cdot \sin \frac{\alpha}{2}, \quad (11)$$

где $k = 0,45$ – коэффициент, учитывающий деформированное состояние металла;

S – толщина металла, мм;

α – угол сектора подгибки, град (см. табл. 1).

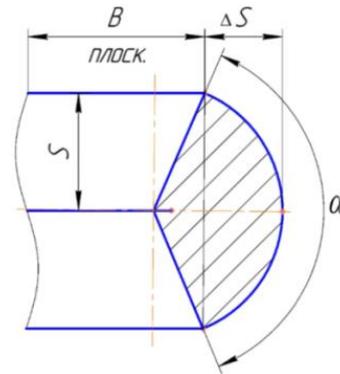


Рис. 12 – Фактическая конфигурация места изгиба двойной толщины

Исходя из изложенного выше, прогнозируемую ширину готового профиля с элементами изгиба двойной толщины (рис. 13) следует определять по зависимости:

$$B = B_{\text{плоск.}} + 2\Delta S. \quad (12)$$

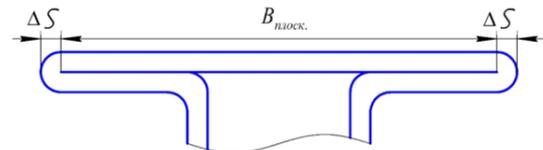


Рис. 13 – Расчетная схема для определения прогнозируемой ширины готового профиля с элементами изгиба двойной толщины

Оценка технологичности новых профилей, подлежащих освоению.

Проверка технологичности профиля включает:

- определение соответствия размеров элементов профилей (ширина элемента не менее $3S$);
- максимальных (поверхностных) деформаций в месте изгиба на 180° (двойной толщины).

Поверхностные деформации (по наружному слою металла) определяются по зависимости:

$$e_1 = \frac{l_{\text{экс.}} - l_0}{l_{\text{экс.}}} \cdot 100\%, \quad (13)$$

где $l_{\text{экс.}}$ – длина наружного слоя металла в месте изгиба на 180° . Определяется по разработанной методике, см. (6);

l_0 – расчетная длина исходной заготовки, см. (3).

Расчетное значение e_1 должно соответствовать неравенству

$$e_1 \leq \delta_5,$$

где δ_5 – относительное удлинение по ГОСТ (для стали Ст. 3 $\delta_5=25\%$, для стали 08кп $\delta_5=24\%$). Данный коэффициент для различных марок стали принимает соответствующие ГОСТам значения и подлежит проверке по указанному выше неравенству.

Относительное утонение ΔS (11), возникающее в месте изгиба, должно сопоставляться с параметром ГОСТа «относительное сужение» (ψ) и соответствовать следующему неравенству

$$e_3 = \Delta S \leq \psi,$$

где ψ – относительное сужение по ГОСТ (для сталей Ст. 3 и 08 кп $\psi=60\%$).

Указанный параметр относительного сужения для различных марок стали принимается соответствующим ГОСТу и подлежит проверке по приведенному выше неравенству.

Выводы

1. Проведены экспериментальные исследования места изгиба на 180° , на основании которых разработаны зависимости для уточненного расчета ширины исходной заготовки и готовых профилей, подлежащих освоению.

2. Выработаны практические рекомендации для применения предложенной модели в конструкторской документации, для повышения технологичности изготовления гнутых профилей с элементами двойной толщины.

Список литературы

1. Тришевский И.С. Теоретические основы процесса профилирования / И.С. Тришевский, М.Е. Докторов. – Москва: Металлургия, 1980. – 288 с.
2. Гун Г.Я. Теоретические основы обработки металлов давлением. – Москва: Металлургия, 1980. – 456 с.
3. Тришевский О.И. Теоретический анализ формовки специальных профилей с местами изгиба на 180° / Тришевский О.И., Плеснецов С.Ю. // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків. – 2009. – № 33. – С. 119–130.
4. Тришевский О.И. Анализ современного состояния производства и применения специальных профилей с местами изгиба на 180° / Тришевский О.И., Плеснецов С.Ю. // Обработка материалов давлением. Сб. науч. трудов ДГМА. – Краматорск. – 2009. – № 2 (21). – С. 227–230.
5. Тришевский О.И. Особенности технологии изготовления профиля опалубки / Тришевский О.И., Плеснецов С.Ю. // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – Москва. – 2010. – № 1. – С. 14–19.
6. Тришевский О.И. Моделирование изгиба металла на 180° и исследование его деформированного состояния с использованием цифровых методов / Тришевский О.И., Плеснецов С.Ю. // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків. – 2009. – № 15. – С. 71–76.
7. Плеснецов Ю.А. Разработка технологии производства профиля «Опалубка» / Плеснецов Ю.А., Тришевский О.И., Плеснецов С.Ю. // Черные металлы. – Москва. – 2010. – № 3-4. – С. 29–32.
8. Тришевский О.И. Разработка методики исследований специальных гнутых профилей с элементами изгиба на 180° и технологии их производства / Тришевский О.И., Плеснецов С.Ю. // Вісник НТУ У «КПІ». – Київ. – 2010. – № 60. – С. 212–215.
9. Тришевский О.И. Исследование возможности производства специальных гнутых профилей с элементами изгиба металла на 180° / Тришевский О.И., Плеснецов С.Ю. // Обработка материалов давлением. Сб. науч. трудов ДГМА. – Краматорск. – 2010. – № 3 (24). – С. 102–107.
10. Плеснецов Ю.А. Анализ деформированного состояния металла при изгибе / Плеснецов Ю.А., Тришевский О.И., Плеснецов С.Ю. // Вісник НТУ У «КПІ». – Київ. – 2011. – № 62. – С. 103–105.
11. Плеснецов С.Ю. Исследование утонений и смещений нейтрального слоя при изгибе листового металла на 180° // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків. – 2011. – № 47. – С. 69–75.
12. Плеснецов С.Ю. Исследование деформированного состояния металла при изгибе до 180° с помощью программного комплекса Deform 3D // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків. – 2012. – № 47. – С. 71–74.
13. Плеснецов С.Ю. Исследование асимметрии в очаге деформации при изгибе металла до 180° // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків. – 2013. – № 42. – С. 139–144.
14. Плеснецов С.Ю. Теоретический анализ деформированного состояния металла в местах изгиба до 180° / Плеснецов С.Ю., Тришевский О.И., // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків. – 2015. – № 24 (1133). – С. 77–86
15. Тришевский О.И. Исследование особенностей формообразования места изгиба металла до 180° /

Тришевский О.И., Плеснецов С.Ю. – С. 171–186. // Пластическая деформация металлов: Коллективная монография. – Днепропетровск НМЕАУ: Акцент ПП. – 2014. – С. 171–186.

References (transliterated)

1. Trishevskiy I.S. *Teoreticheskiye osnovy protsessa profilirovaniya* [Theoretical basics of profiling process] / I.S. Trishevskiy., M.E. Doktorov. – Moscow: Metallurgiya, 1980. – 288 p.
2. Gun G.Ya. *Teoreticheskiye osnovy obrabotki metallov davleniyem* [Theoretical basics of metal forming]. – Moscow: Metallurgiya, 1980. – 456 p.
3. Trishevskiy O.I. *Teoreticheskiy analiz formovki spetsialnykh profiley s mestami izgiba na 180°* [Theoretical analysis of special profile forming with curvatures up to 180°] / Trishevskiy O.I., Plesnetsov S.Yu. // Visnik NTU «KhPI». – Kharkiv. – 2009. – No 33. – P. 119–130.
4. Trishevskiy O.I. *Analiz sovremennoho sostoyaniya proizvodstva i primeneniya spetsialnykh profiley s mestami izgiba na 180°* [Modern state of special profile production and usage analysis with 180° curvatures] / Trishevskiy O.I., Plesnetsov S.Yu. // Obrabotka materialov davleniyem. Sb. nauch. trudov DGMA. – Kramatorsk. – 2009. – No 2 (21). – P. 227–230.
5. Trishevskiy O.I. *Osobennosti tekhnologii izgotovleniya profilya opalubki* [Peculiarities of casing profile production technology] / Trishevskiy O.I., Plesnetsov S.Yu. // Kuznechno-shtampovochnoye proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniyem. – Moscow. – 2010. – No 1. – P. 14–19.
6. Trishevskiy O.I. *Modelirovaniye izgiba metalla na 180° i issledovaniye ego deformirovannogo sostoyaniya s ispolzovaniyem tsifrovyykh metodov* [Modelling the 180° metal bending and research of its deformed state using digital methods] / Trishevskiy O.I., Plesnetsov S.Yu. // Visnik NTU «KhPI». – Kharkiv. – 2009. – No 15. – P. 71–76.
7. Plesnetsov Yu.A. *Razrabotka tekhnologii proizvodstva profilya «Opalubka»* [Development of the “Casing” profile production technology] / Plesnetsov Yu.A., Trishevskiy O.I., Plesnetsov S.Yu. // Chernyye metally. – Moscow. – 2010. – No 3-4. – P. 29–32.
8. Trishevskiy O.I. *Razrabotka metodiki issledovaniya spetsialnykh gnutyykh profiley s elementami izgiba na 180° i tekhnologii ikh proizvodstva* [Development of special profiles with 180° curvatures research methods and production technology] / Trishevskiy O.I., Plesnetsov S.Yu. // Visnik NTU U «KPI». – Kiiiv. – 2010. – No 60. – P. 212–215.
9. Trishevskiy O.I. *Issledovaniye vozmozhnosti proizvodstva spetsialnykh gnutyykh profiley s elementami izgiba metalla na 180°* [Special bent profile with 180° curvatures production possibility research] / Trishevskiy O.I., Plesnetsov S.Yu. // Obrabotka materialov davleniyem. Sb. nauch. trudov DGMA. – Kramatorsk. – 2010. – No 3 (24). – P. 102–107.
10. Plesnetsov Yu.A. *Analiz deformirovannogo sostoyaniya metalla pri izgibe* [Analysis of deformed state during bending] / Plesnetsov Yu.A., Trishevskiy O.I., Plesnetsov S.Yu. // Visnik NTU U «KPI». – Kiiiv. – 2011. – No 62. – P. 103–105.
11. Plesnetsov S.Yu. *Issledovaniye utoneniy i smeshcheniya neytralnogo sloya pri izgibe listovogo metalla na 180°* [Research of thinning and neutral layer shift when bending sheet metal up to 180°] // Visnik NTU «KhPI». – Kharkiv. – 2011. – No 47. – P. 69–75.
12. Plesnetsov S.Yu. *Issledovaniye deformirovannogo sostoyaniya metalla pri izgibe do 180° s pomoshchyu programmnoho kompleksa Deform 3D* [Research of metal deformed state during 180° bending using Deform 3D program complex] // Visnik NTU «KhPI». – Kharkiv. – 2012. – No 47. – P. 71–74.
13. Plesnetsov S.Yu. *Issledovaniye asimmetrii v ochage deformatsii pri izgibe metalla do 180°* [Deformation center asymmetry in case of 180° bending research] // Visnik NTU «KhPI». – Kharkiv. – 2013. – No 42. – P. 139–144.
14. Plesnetsov S.Yu. *Teoreticheskiy analiz deformirovannogo sostoyaniya metalla v mestakh izgiba do 180°* [Theoretical analysis of metal deformed state in 180° bending areas] / Plesnetsov S.Yu., Trishevskiy O.I. // Visnik NTU «KhPI». – Kharkiv. – 2015. – No 24 (1133). – P. 77–86
15. Trishevskiy O.I. *Issledovaniye osobennostey formoobrazovaniya mesta izgiba metalla do 180°* [Research of 180° bending area forming peculiarities] / Trishevskiy O.I., Plesnetsov S.Yu. – P. 171–186. // Plasticheskaya deformatsiya metallov: Kollektivnaya monografiya. – Dnepropetrovsk NMEAU: Aktsent PP. – 2014. – P. 171–186.

Поступила (received) 13.10.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Методика визначення ширини вихідної заготовки для спеціальних гнутих профілей з елементами подвійної товщини при проектуванні та контролі / С. Ю. Плеснецов, // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – №43(1265). – С. 24–29 – Библиогр.: 15 назв.– ISSN 2519-2671

Методика определения ширины исходной заготовки для специальных гнутых профилей с элементами двойной толщины при проектировании и контроле / С. Ю. Плеснецов, // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – №43(1265). – С. 24–29 – Библиогр.: 15 назв.– ISSN 2519-2671

Method of initial blank width determining for special bent profiles with the elements of double thickness in design and testing / S. Yu. Plesnetsov, // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Innovative technologies and equipment of materials processing in engineering and metallurgy. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2017. – No 43(1265). – P. 24–29. – Bibl.: 15. – ISSN 2519-2671

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

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

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

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

УДК 621.771.63

Ю.А. ПЛЕСНЕЦОВ, Е.Н. ХРИСТИЧЕНКО, А.Н. ХРИСТИЧЕНКО

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ПРОФИЛЕЙ С ПЕРИОДИЧЕСКИ ПОВТОРЯЮЩИМИСЯ ГОФРАМИ

Изготовление профилей с периодически повторяющимися гофрами жесткости сопровождается значительными прогибами валков формирующей клетки, их износом и проскальзыванием металла в валках, что приводит к недоформовке периодических гофров, отклонению периода от номинального размера. Полученные результаты, обеспечили возможность повышения качества металлопродукции при значительных объемах ее производства, совершенствование технологических процессов, повышение их стабильности. Разработана методика компенсации прогиба валков при валковой формовке профилей с периодически повторяющимися гофрами. Применение разработанной методики позволит стабилизировать размеры профилей с периодически повторяющимися гофрами, получить на них гофры более точной конфигурации, компенсировать износ элементов на основе использования системы унификации валков. Применяя поворот элементов на 180°, а также перестановку их с верхнего валка на нижний и наоборот, можно существенно повысить качество профилей при одновременном увеличении срока службы валков. Полученное уравнение для определения линейной скорости заготовки в клетке, предшествующей формирующей, рекомендуется к использованию при разработке технологии формовки вновь осваиваемых профилей с периодически повторяющимися гофрами.

Ключевые слова: профили с периодически повторяющимися гофрами, формовка в валках, стабилизация периода, высота гофров, увеличение срока службы валков.

Виготовлення профілів з періодично повторюваними гофрами жорсткості супроводжується значними прогинаннями валків формуючої кліти, їх зносом і ковзанням металу в валках, що призводить до недоформування періодичних гофрів, відхилення періоду від номінального розміру. Отримані результати, забезпечили можливість підвищення якості металопродукції при значних обсягах її виробництва, вдосконалення технологічних процесів, підвищення їх стабільності. Розроблено методику компенсації прогину валків при валковому формуванні профілів з періодично повторюваними гофрами. Застосування розробленої методики дозволить стабілізувати розміри профілів з періодично повторюваними гофрами, отримати на них гофри більш точної конфігурації, компенсувати знос елементів на основі використання системи уніфікації валків. Застосовуючи поворот елементів на 180°, а також перестановку їх з верхнього валка на нижній і навпаки, можна істотно підвищити якість профілів при одночасному збільшенні терміну служби валків. Отримане рівняння для визначення лінійної швидкості заготовки в клітці, що передує формуючій, рекомендується до використання при розробці технології формування освоєваних профілів з періодично повторюваними гофрами.

Ключові слова: профілі з періодично повторюваними гофрами, формування в валках, стабілізація періоду, висота гофрів, збільшення терміну служби валків.

The production of profiles with periodically repeating stiffening corrugations is accompanied by significant deflection of the rolls of the forming stand, their wear and slipping of the metal in the rolls, which leads to the undeforming of periodic corrugations, to the deviation of the period from the nominal size. The obtained results provided the opportunity to improve the quality of metal products with significant volumes of its production, improve technological processes, increase their stability. A technique is developed for compensating the deflection of rolls during roll forming of profiles with periodically repeating corrugations. The application of the developed technique will allow to stabilize the sizes of profiles with periodically repeating corrugations, to obtain on them corrugations of a more accurate configuration, to compensate for the wear of the elements on the basis of the unification of the rolls. Applying the rotation of the elements by 180°, as well as rearranging them from the upper roll to the lower one and vice versa, it is possible to significantly improve the quality of the profiles while simultaneously increasing the service life of the rolls. The resulting equation for determining the linear speed of the preform in the cage preceding the forming is recommended for use in the development of technology for forming newly developed profiles with periodically repeating corrugations.

Keywords: profiles with periodically repeating corrugations, forming in rolls, period stabilization, corrugation height, increase in the service life of rolls.

Введение. Изготовление профилей с периодически повторяющимися гофрами жесткости сопровождается значительными прогибами валков формирующей клетки, их износом и проскальзыванием металла в валках, что приводит к недоформовке периодических гофров, отклонению периода и т.п. Полученные в работе результаты позволяют усовершенствовать технологический процесс валковой формовки профилей с периодическими гофрами, что, безусловно, является важным и актуальным.

Методика проведения исследований. Тензометрия, геометрические методы, методы математической статистики.

Основные результаты исследований.

Компенсация прогиба валков при производстве профиля крышки люка полувагона. При изготовлении крышки люка грузового полувагона – наиболее энергоемкого профиля в сортаменте профилегибочного агрегата 1-5х300-1650 происходит повышенный прогиб валков. По условия

пластичности стали 10ХНДП, идущей на изготовление профиля, максимальная высота гофров, при которой не нарушается их сплошность, – 30 мм, что на 2 мм превышает нижний предел допуска по высоте гофров по ТУ 14-2-280. Поэтому исследование, учет и компенсация прогиба валков, приобретают важное значение.

Исследования прогиба валков проведены на профилегибочном агрегате 1-5х300-1650 при формовке профиля крышки люка на листах длиной 2000 мм, отрезанных от рулонной заготовки. После подготовки листов (сверления отверстий, нарезки резьбы, закручивания алюминиевых штифтов высотой 15-20мм) их задавали в профилегибочный агрегат. По высоте штифтов после деформирования определяли межвалковый зазор при формовке. Схема размещения штифтов (1-7) на профиле и результаты замеров их высоты h и высоты гофров H приведены на рис. 1. Чтобы исключить влияние на них износа валков, эксперименты проводили на новом комплекте валков.

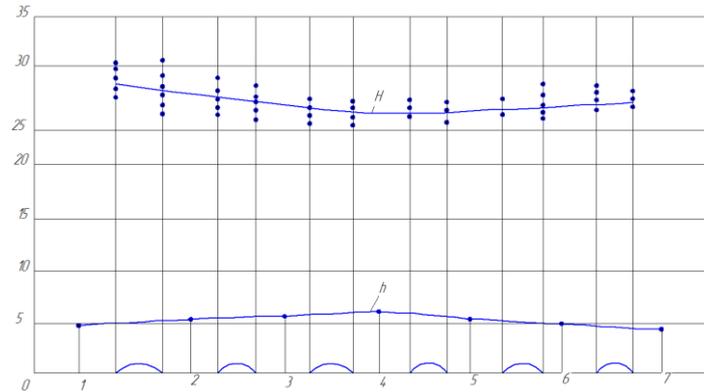


Рис. 1 – Распределение высоты гофров H и штифтов h по поперечному сечению профиля: 1–7 – места закрепления штифтов

Максимальный межвалковый зазор (без толщины заготовки, равной 5 мм) составляет 1,7 мм. Поскольку профиль имеет одинаковые радиусы у вершины и основания гофров, а диаметры верхнего и

нижнего валков выполнены равными друг другу (рис. 2), одинаковыми должны быть и величины прогиба валков.

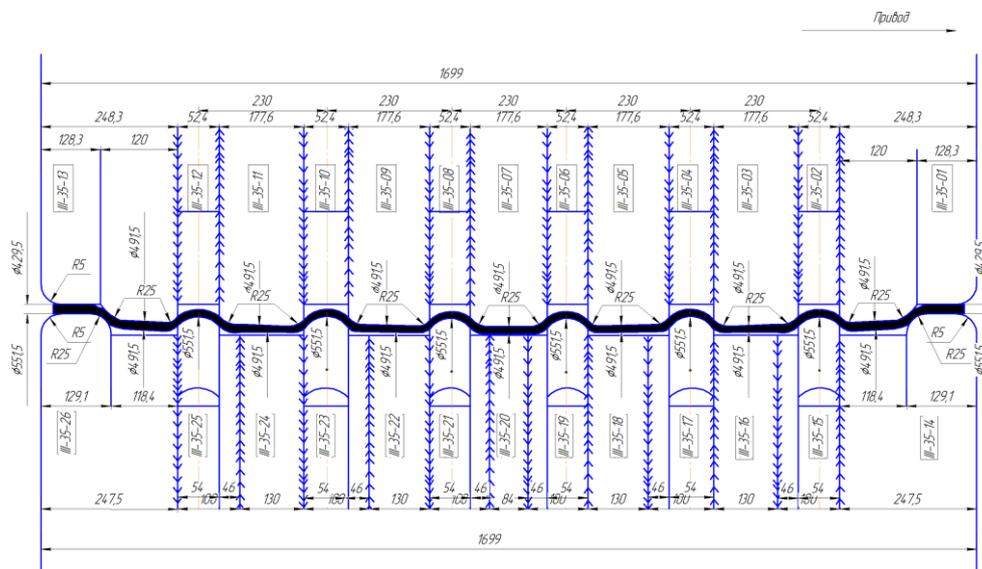


Рис. 2 – Первоначальный вариант калибровки валков для производства профиля крышки люка

С учетом изложенного, было сделано допущение, что максимальный прогиб каждого из валков равен половине максимального межвалкового зазора (без толщины полосы), то есть 0,85 мм. Справедливость этого допущения была подтверждена замерами высоты алюминиевых штифтов с обеих сторон листа после деформирования.

Для учета прогибов валков при разработке технологии производства новых профилей, а также при корректировке калибровок валков для формовки ранее освоенных, необходимо получить аналитические зависимости, по которым можно было бы определить его величину. Поскольку валки для производства профилей высокой жесткости изготавливаются наборными (на валы надеваются определенные шайбы), расчет прогиба с учетом случайных факторов (точность изготовления и монтажа шайб), не представляется возможным.

Для аналитического определения в первом приближении прогиба валков целесообразно использовать известную расчетную схему, в

соответствии с которой, валок представляют в виде однопролетной балки с шарнирной заделкой обоих концов [1]. Для упрощения расчетов распределенную по площадке контакта нагрузку приводим к эквивалентной сосредоточенной силе P . Максимальный прогиб валка в этом случае определяется по известной зависимости

$$f_{max} = \frac{10 \cdot P \cdot L^3}{384 \cdot B \cdot I} \quad (1)$$

где P – внешняя нагрузка;

L – длина пролета балки между опорами;

E – модуль упругости;

I – осевой момент инерции.

Сплюсчивание валков в соответствии с зависимостью

$$f_Q = 0.5796 \cdot \frac{P}{IE} \cdot \left(l n \frac{D^2}{b^2} + 0.814 \right), \quad (2)$$

где l – длина участка контакта валков с полосой;

D – диаметр валков;

b – полуширина полоски контакта, определяемая из следующего соотношения:

$$b = 1.076 \sqrt{\frac{P \cdot D}{2 \cdot l \cdot E}} \quad (3)$$

Суммарный прогиб валков

$$f_B = f_{max} + f_Q \quad (4)$$

Внешняя нагрузка P принята равной усилию деформирования.

Параметры, входящие в зависимости (1–4), в соответствии с принятой расчетной схемой для валков, обеспечивающих формовку профиля крышки люка, имеют следующие численные значения: $L=2,45$ м; $l=1,65$ м; $D=0,49$ м; диаметр вала $d_b=0,35$ м; $l_D=2863 \times 10^6$ м⁴; $I_d = 736 \times 10^6$ м⁴; $E=2058$ Н/м²; $P=666,4$ кН; $b=7,36 \times 10^6$ м.

Усилие деформирования P для случая формовки крышки люка определено экспериментально на агрегате 1-5х300-1650.

Поскольку для аналитического определения прогиба валков была принята упрощенная схема, не учитывающая конструкции реального вала, для оценки степени точности и, соответственно, возможности использования расчетных зависимостей (1-4) по ним были просчитаны прогибы вала f_{max}^d и цельного вала f_{max}^D с размерами, необходимыми для производства рассматриваемого профиля, а также величина сплющивания валков f_Q .

Полученные результаты, мм:

$$\begin{aligned} f_{max}^d &= 1,680; \\ f_{max}^D &= 0,430; \\ f_Q &= 0,015; \\ f_B^d &= 1,695; \\ f_B^D &= 0,445 \end{aligned}$$

были сопоставлены с усредненным экспериментальным значением прогиба валков $f_B^3=0,850$.

Сопоставление показало, что экспериментальное значение меньше расчетного значения прогиба вала f_B^d на 48,85% и больше расчетного прогиба цельного вала f_B^D на 47,66%.

Учитывая изложенное, для аналитического определения максимальных прогибов валков при производстве профилей высокой жесткости можно рекомендовать зависимость

$$f_{max} = K \cdot f_B^d, \quad (5)$$

где K – коэффициент, определяемый экспериментально, (для рассматриваемого профиля $K=0,5$);

f_B^d – суммарный прогиб вала, определяемый по зависимости (4).

Значение коэффициента K зависят от ряда факторов, в частности, от соотношения размеров валков, деформации подшипников, сжатия подушек, упругой деформации станины. Оно должно быть уточнено применительно к различным случаям валковой формовки профилей с периодически повторяющимися гофрами жесткости.

Расчетами по предложенной методике установлено, что для получения профиля крышки люка без разрывов (трещин по гофрам) их высота не должна быть более 30 мм. Эта высота принята в качестве исходной для изготовления новых комплектов валков. В соответствии с ТУ 14-2-280 высота гофров по нижнему пределу допуска составляет 28,3 мм, что очень близко к нижнему пределу высоты гофра, равному 28 мм. Следовательно, при межвалковом зазоре $h=1,7$ мм (см. рис. 1) новый комплект валков обеспечит формовку в центральной зоне профиля гофров высотой 28,3 мм, что очень близко к нижней границе допуска. Замеры высоты H гофров на готовых профилях, полученных в изношенных валках (изготовлено 4482 т профилей), показали, что разница в высоте крайних и средних гофров составляет 1,58 мм. Высота гофров центрального участка находится в пределах от 27,8 мм до 26,62 мм, то есть выходит за нижнюю границу поля допуска на высоту гофров, регламентируемую ТУ 14-2-280.

С целью обеспечения одинаковой высоты гофров по поперечному сечению профилей с периодически повторяющимися гофрами и получения более точной их конфигурации, разработана новая калибровка валков (рис. 3), в которой, в отличие от используемой в настоящее время, предусмотрена компенсация прогиба валков и пружинения гофров путем соответствующего увеличения диаметров выпуклых формирующих элементов в центральной зоне вала. Диаметры выпуклых формирующих элементов в центральной зоне вала рассчитывали по зависимости:

$$D_\phi = D + 2(H + 2f_B + \Delta H), \quad (6)$$

где D – основной диаметр вала;

H – высота гофра;

f_B – прогиб вала, определяемый по зависимости (4);

ΔH – уменьшение высоты гофра, связанное с пружинением и определяемое в соответствии с рекомендациями работы.

Анализ результатов исследований показал, что элементы валков можно объединить в четыре группы с разной интенсивностью износа. Кривые накопления среднего износа элементов валков по группам в зависимости от объема производства профилей приведены на рис. 4, сопоставительные данные об интенсивности износа – в табл. 1.

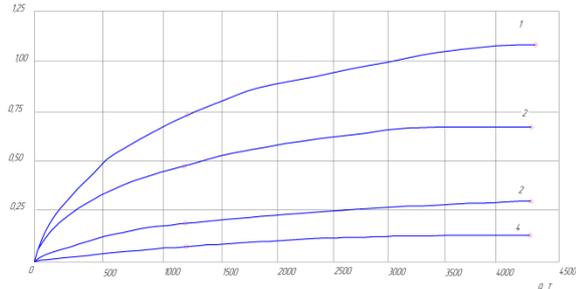


Рис. 4 – Кривые накопления износа: 1-4 – группы элементов

Снижение интенсивности износа валков с увеличением количества полученных в них профилей объясняется наклепом поверхностью слоя валков в процессе эксплуатации.

Наиболее интенсивному износу подвергаются формирующие элементы, расположенные на нижнем валке (I группа). Прогиб валков в данном случае не уменьшает интенсивности износа, так как формирующие элементы постоянно находятся в контакте с металлом.

На интенсивность износа элементов валков II–IV групп прогиба валков оказывает ослабляющее влияние. В группы II, III с более интенсивным износом входят элементы, находящиеся на краях валков, то есть там, где прогиб является наименьшим. Кроме того, наблюдается разница в интенсивности износа крайних элементов верхнего (группа II) и нижнего (группа III) валков. Износ первых на 62% больше. Это объясняется особенностями принятой в настоящее время калибровки (см. рис. 2).

Крайние элементы валков (1, 13, 14, 26), подгибая технологические корытные отбортовки, тем самым формируют как бы сквозные гофры (обратные периодическим) между плоскими боковыми участками и ближайшими к ним гофрами. Это обстоятельство, в сочетании с незначительной величиной прогиба валков, приводит к увеличенному износу крайних элементов верхнего валка.

Прогибом валков объясняется существенно меньший износ элементов группы IV. При этом, очевидно, также имеет место разница в износе элементов верхнего и нижнего валка, связанная с формовкой сквозных гофров, обратных периодическим. Однако (по-видимому, из-за незначительной величины абсолютного износа) эта разница, находящаяся в пределах погрешности измерений, не была выявлена.

Одновременно с замерами диаметров элементов валков, то есть исследованием изменения линейных размеров, при помощи шаблонов был установлен характер износа формирующих элементов и участков

закругления валков, обеспечивающих получение заданных радиусов перехода гофров в плоскость (рис. 5). Наиболее интенсивно изнашивается их средняя часть. Максимальный износ формирующих элементов и участков закруглений одинаков и численно определяется кривой 1 рис. 4

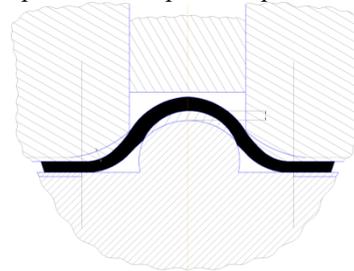


Рис. 5 – Характер износа формирующего элемента и участков закругления

В целях повышения точности размеров рекомендовано предусматривать комплект унифицированных сменных шайб для замены изношенных участков.

Зависимость накопления износа на элементах валков от объема производства профилей может быть аппроксимирована степенной функцией вида

$$\Delta = K \cdot Q^n \quad (6)$$

Для кривой 1 (рис. 4) зависимость (6) принимает вид

$$\Delta = 0,0603 \cdot Q^{0.3378}; \quad (7)$$

для кривой 2

$$\Delta = 0,1320 \cdot Q^{0.2463}; \quad (8)$$

для кривой 3

$$\Delta = 0,0515 \cdot Q^{0.3567}; \quad (9)$$

для кривой 4

$$\Delta = 0,0782 \cdot Q^{0.3069}. \quad (10)$$

Расхождения расчетных и экспериментальных значений не превышают 5%, что позволяет использовать зависимости (7–10) для прогнозирования износа новых комплектов валков.

При работе нового комплекта валков в центральной зоне профиля крышки люка формируются гофры высотой 28,3 мм, что очень близко к нижней границе допуска. Согласно ТУ 14-2-280 высота гофров профиля по нижнему пределу допуска составляет 28 мм. При установленном характере износа формирующих элементов (см. рис. 4, кривая 1) можно ожидать, что новый комплект валков обеспечит производство только 300-400 т профилей, соответствующих техническим условиям.

С целью получения профилей с гофрами одинаковой высоты по всему поперечному сечению и с более точной его конфигурацией, а также для продления срока службы комплектов валков, разработана новая калибровка (рис. 6), в которой, в отличие от существующей, предусмотрена компенсация износа элементов на основе

гладкой бочкой должен обеспечивать необходимое торможение заготовки. Для определения этого диаметра аналитически рассчитывали линейные скорости в калибре формовочной клетки.

Линейная скорость точек на окружности основного диаметра $D_{\text{осн}}$ формующего валка (рис. 8).

$$v_i = \omega R_{\text{осн}}, \quad (11)$$

где ω – угловая скорость.

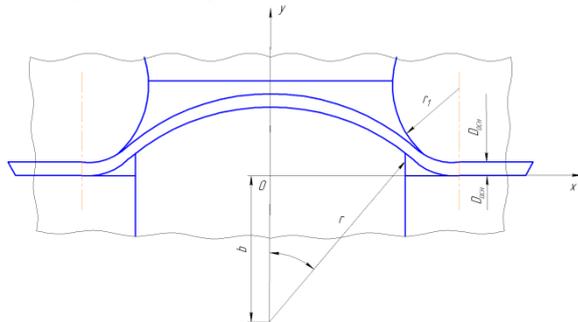


Рис. 8 – Схема расчета линейных скоростей в калибре формовочной клетки

В рассматриваемом случае основные диаметры верхнего и нижнего формующих валков равны.

Для определения линейных скоростей точек на контуре поперечного сечения выпуклого формующего элемента нижнего валка воспользуемся уравнением окружности. При расположении осей координат, приведенном на рис. 8, ордината каждой из точек составит

$$y = \sqrt{r^2 - x^2 - b}, \quad (12)$$

где r – радиус формующего элемента нижнего валка;
 b – расстояние от центра окружности радиуса до начала координат.

Текущие координаты точек по оси X.

$$0 \leq x \leq r \sin \alpha.$$

Следовательно, линейная скорость любой такой точки может быть определена по зависимости

$$v_i = \omega [R_{\text{осн}} + (\sqrt{r^2 - x^2 - b})] = \omega [(R_{\text{осн}} - b) + \sqrt{r^2 - x^2}]. \quad (13)$$

Для определения площади эпюры скоростей по ширине формующего элемента нижнего валка проинтегрируем выражение (13) по x в пределах от нуля до $r \sin \alpha$

$$Q_{\text{сум}}^{\text{н}} = 2 \int_0^{r \sin \alpha} \omega [(R_{\text{осн}} - b) + \sqrt{r^2 - x^2}] dx. \quad (14)$$

После интегрирования, получим

$$v_{\text{сум}}^{\text{н}} = 2\omega r \sin \alpha (R_{\text{осн}} - b) + \omega r^2 (\sin \alpha \cos \alpha + \alpha \text{рад}). \quad (15)$$

Аналогично для верхнего валка

$$v_{\text{сум}}^{\text{в}} = 2\omega r_1 \sin \alpha (R_{\text{осн}} - r_1) + \omega r_1^2 (\sin \alpha \cos \alpha + \alpha \text{рад}). \quad (16)$$

где r_1 – радиус перехода гофра в плоскости на верхнем валке.

Средние линейные скорости на нижнем и верхнем валке на этих участках определяются выражениями

$$v_{\text{ср}}^{\text{н}} = \frac{2\omega r \sin \alpha (R_{\text{осн}} - b) + \omega r^2 (\sin \alpha \cos \alpha + \alpha \text{рад})}{b + \frac{r}{2} \left(\cos \alpha + \frac{\alpha \text{рад}}{\sin \alpha} \right)} = \omega \left[R_{\text{осн}} - \frac{2r \sin \alpha}{\sin \alpha} \right]; \quad (17)$$

$$v_{\text{ср}}^{\text{в}} = \frac{2\omega r_1 \sin \alpha (R_{\text{осн}} - r_1) + \omega r_1^2 (\sin \alpha \cos \alpha + \alpha \text{рад})}{r_1 + \frac{r_1}{2} \left(\cos \alpha + \frac{\alpha \text{рад}}{\sin \alpha} \right)} = \omega \left[R_{\text{осн}} - r_1 \right]. \quad (18)$$

Анализ схемы на рис. 8 показывает, что листовая заготовка в калибре валков будет перемещаться равномерно с линейной скоростью, равной

$$v_{\text{ср}}^{\text{н}} = v_{\text{ср}}^{\text{в}}. \quad (19)$$

Это условие выполнимо, если

$$r = r_1. \quad (20)$$

В сортамент профилегибочного агрегата 1÷5х300÷1650 входят профили с гофрами, радиусы у вершины и основания которых равны. Однако, для большинства профилей с периодически повторяющимися гофрами, они требуются различными, причем радиус у вершины гофра обычно больше радиуса у основания гофра. В этом случае валки предыдущей клетки должны иметь меньший основной диаметр, чем валки формовочной клетки.

Очевидно, что линейная скорость заготовки в предыдущей клетки может быть определена по зависимости

$$v_o = \omega R_o = \omega R_{\text{осн}} - (v_{\text{ср}}^{\text{н}} - v_{\text{ср}}^{\text{в}}). \quad (21)$$

Откуда

$$R_o = \frac{\omega R_{\text{осн}} - (v_{\text{ср}}^{\text{н}} - v_{\text{ср}}^{\text{в}})}{\omega}. \quad (22)$$

Подставив (17) и (18) в (22) и произведя очевидные преобразования, получим зависимость для определения основного радиуса валков задающей клетки

$$R_o = R_{\text{осн}} + b - r_1 + \frac{(r_1 - r)}{2} \left(\cos \alpha + \frac{\alpha \text{рад}}{\sin \alpha} \right). \quad (23)$$

Выводы

1. Полученное выражение для определения линейной скорости заготовки в клетки, предшествующей формующей, рекомендуется к использованию при разработке технологии формовки вновь осваиваемых профилей с периодически повторяющимися гофрами.

2. На основе результатов исследований, проведенных на профилегибочном агрегате 1-5х300-1650, разработана методика компенсации прогиба валков при валковой формовке профилей с периодически повторяющимися гофрами, которая использована при разработке новой калибровки валков для формовки крышки люка. Применение разработанной методики позволит улучшить качество других профилей высокой жесткости (стабилизировать их размеры, получить на них гофры более точной конфигурации).

3. Разработана новая калибровка (рис. 6), в которой, в отличие от существующей, предусмотрена компенсация износа элементов на основе использования системы унификации валков. Применяя поворот элементов на 180°, а также перестановку их с верхнего валка на нижний и наоборот, можно существенно повысить качество профилей при одновременном увеличении срока службы валков.

4. Полученное выражение для определения линейной скорости заготовки в клети, предшествующей формующей, рекомендуется к использованию при разработке технологии формовки вновь осваиваемых профилей с периодически повторяющимися гофрами.

Список літератури

1. Писаренко Г.С. Справочник по сопротивлению материалов. / Г.С. Писаренко, А.П. Яковлев, В.В. Матвеев. – Киев: Наукова думка, 1988. – 736 с.
2. Рокотян Е.С. Прокатное производство. Справочник. – Москва: Metallurgizdat, 1962. – 743 с.
3. Тришевский, И.С. Теоретические основы процесса профилирования: монография / И.С. Тришевский, М.Е. Докторов. – Москва: Металлургия, 1980. – 287 с.
4. Тришевский И.С. Производство деталей из гнутых профилей / И.С. Тришевский, В.С. Марьин, В.А. Хмель. – Киев: Техніка, 1985. – 127 с.

5. Тришевский И.С. Калибровка валков для производства гнутых профилей проката: монография / И.С. Тришевский, В.И. Мирошниченко, В.П. Стукалов. – Киев: Техніка, 1980. – 168 с.
6. Тришевский И.С. Производство гнутых профилей. Оборудование и технология: монография / И.С. Тришевский, А.Б. Юрченко, В.С. Марьин. – Москва: Металлургия, 1982. – 384 с.

Bibliography (transliterated)

1. Pisarenko G.S. Spravochnik po soprotivleniyu materialov. / G.S. Pisarenko. A.P. Yakovlev. V.V. Matveyev. – Kiev: Naukova dumka. 1988. – 736 p.
2. Rokotyay E.S. Prokatnoye proizvodstvo. Spravochnik. – Moscow: Metallurgizdat. 1962. – 743 p.
3. Trishevskiy I.S. Teoreticheskiye osnovy protsessa profilirovaniya: monografiya / I.S. Trishevskiy. M.E. Doktorov. – Moscow: Metallurgiya. 1980. – 287 p.
4. Trishevskiy I.S. Proizvodstvo detaley iz gnutykh profiley / I.S. Trishevskiy. V.S. Marin. V.A. Khmel. – Kiev: Tekhnika. 1985. – 127 p.
5. Trishevskiy I.S. Kalibrovka valkov dlya proizvodstva gnutykh profiley prokata: monografiya / I.S. Trishevskiy. V.I. Miroshnichenko. V.P. Stukalov. – Kiev: Tekhnika. 1980. – 168 p.
6. Trishevskiy I.S. Proizvodstvo gnutykh profiley. Oborudovaniye i tekhnologiya: monografiya / I.S. Trishevskiy. A.B. Yurchenko. B.C. Marin. – Moscow: Metallurgiya. 1982. – 384 p.

Поступила (received) 13.10.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Совершенствование технологии производства профилей с периодически повторяющимися гофрами / Ю.А. Плеснецов, Е.Н. Христиченко, А.Н. Христиченко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 43 (1265). – С. 30–38. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2519-2671.

Удосконалення технології виробництва профілів з періодично повторюваними гофрами / Ю.О. Плеснецов, Є.М. Христиченко, А.М. Христиченко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 43 (1265). – С. 30–38. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2519-2671.

Perfection of production technology of profiles with periodically repeating corrugations / Yu. A. Plesnetsov, E.N. Khristichenko, A.N. Khristichenko // Bulletin of the NTU "KhPI". Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy. – Kh.: NTU "KhPI", 2017. – No. 43 (1265). – P. 30–38. – Bibliogr.: 6. – ISSN 2519-2671.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

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

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

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

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

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

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

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

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

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

УДК 621.7.044

Р.Г. ПУЗЫРЬ, Р.В. ЛЕВЧЕНКО, Ю.Б. СИРАЯ**ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА РАЗДАЧИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ЗАГОТОВКИ**

Теоретичним аналізом встановлена можлива межа втрати стійкості заготовки при роздачі конічним пуансоном циліндричної заготовки з підпором торцевої зони. Для аналізу використовували інженерний метод визначення напруженого стану в осередку деформації, а також методи теорії циліндричних оболонок для визначення переміщень. Отримані залежності можуть бути використані для проектування технологічних процесів деформування трубних заготовок. Інтенсифікація процесу здійснюється за рахунок збільшення ступеню деформації крайових ділянок заготовки, причому підпір торця усуває руйнування у вигляді локалізації деформації з появою поздовжньої тріщини. Показано, що утворення тріщин збільшується на заготовках зі зварними швами, які загалом знижують пластичність матеріалу. Крайовий підпір може призвести до утворення складки на недеформованій частині заготовки.

Ключові слова: циліндрична заготовка; стійкість; напруження; згинаючий момент; деформація; роздача.

Теоретическим анализом установлена возможная граница потери устойчивости заготовки при раздаче коническими пуансонами цилиндрической заготовки с подпором торцевой зоны. Для анализа использовали инженерный метод определения напряженного состояния в очаге деформации, а также методы теории цилиндрических оболочек для определения перемещений. Полученные зависимости могут быть использованы для проектирования технологических процессов деформирования трубных заготовок. Интенсификация процесса осуществляется за счет увеличения степени деформации краевых участков заготовки, причем подпор торца устраняет разрушение в виде локализации деформаций с появлением продольной трещины. Показано, что трещинообразование увеличивается на заготовках со сварными швами, которые, в общем, снижают пластичность материала. Краевой подпор может привести к образованию складки на недеформируемой части заготовки.

Ключевые слова: цилиндрическая заготовка; устойчивость; напряжения; изгибающий момент; деформация; раздача.

The theoretical analysis has established possible border of loss of stability of preparation at distribution by conic punches of cylindrical preparation with a subtime of a face zone. For the analysis used an engineering method of definition of tension in the deformation center and also methods of the theory of cylindrical covers for definition of movements. The received dependences can be used for design of technological processes of deformation of pipe preparations. The intensification of process is carried out due to increase in extent of deformation of regional sites of preparation, and a subtime of an end face eliminates destruction in the form of localization of deformations with the advent of a longitudinal crack. It is shown that the cracks formation increases on preparations with welded seams which generally reduce plasticity of material. Regional a subtime can lead to formation of a fold on not deformable part of preparation.

Keywords: cylindrical preparation; stability; tension; the bending moment; deformation; distribution.

Введение. На сегодняшний день достаточноактуальной научной задачей является получение полноценной аналитической модели заготовки на определенных этапах ее производства, использование которой даст возможность реализации большинства научных задач по повышению качества и ресурса эксплуатации готовых изделий. В колесном производстве при изготовлении стальных ободьев колес первым технологическим переходом их изготовления является раздача цилиндрической заготовки. Раздачу проводят с целью уменьшения степени деформации на последующем за раздачей переходе радиально-ротационного профилирования, при этом стремятся получить как можно больший коэффициент раздачи, соответствующий определенным условиям деформирования. Коэффициент раздачи ограничивается разрушением заготовки в виде продольной трещины по сварному шву, в околошовной зоне или в сплошном металле, начинающейся в основном на торце заготовки, а также потерей устойчивости недеформируемой части заготовки в виде возникновения поперечной кольцевой складки.

Цель работы. Определение условий возникновения потери устойчивости в виде кольцевого выступа на недеформированной части заготовки в зависимости от технологических параметров процесса раздачи, торцевого подпора и

механических характеристик используемого материала.

Изложение основного материала. Научные наработки [1, 2, 3] относительно процесса обжима-раздачи являются базовыми для создания и усовершенствования большинства теоретических методов и методик расчета технологических параметров рассматриваемого процесса и изыскания эффективных приемов по интенсификации производства. Поэтому данные про особенности процесса деформирования трубных заготовок раздачей представляют практический и теоретический интерес.

Наибольший интерес в данном исследовании представляют существующие приемы, направленные на увеличение степени деформации с устранением разрушения или потери устойчивости заготовки. Так, в исследованиях Ершова В.И. [4] предложены различные способы интенсификации процесса в виде наложения на деформируемую часть заготовки эластичных колец, бандажей из более пластичных металлов, разделения операции на несколько переходов с получением на первом овальных в плане полуфабрикатов. По сведениям автора, подобные способы позволяют увеличить степень деформации без разрушения заготовки. Применение данных приемов в средне и крупносерийном производстве затrudнено, так как наложение на каждую заготовку

дополнительных связей и дифференцирование перехода увеличивает штучное время и снижает производительность. Известен способ [5], направленный на повышение степени формоизменения при раздаче трубных заготовок за счет исключения потери устойчивости в зоне передачи усилия и разрушения передней торцевой кромки. Для достижения указанной цели снаружи трубной заготовки, перед наталкиванием ее на пуансон, устанавливается дополнительная трубная заготовка большей толщины с внутренним диаметром, равным наружному диаметру основной трубной заготовки и из более пластичного металла, например, свинца.

Так как при одновременном наталкивании на пуансон двух заготовок со стороны внешней заготовки, имеющей большую толщину стенки (в три и более раз), создается давление на поверхность внутренней, то это приводит к созданию гидростатического давления в материале последней. Наличие гидростатического давления позволяет исключить разрушение передней торцевой кромки внутренней трубной заготовки. Кроме того, наличие внешнего подпора в виде наружной трубы исключает вероятность потери устойчивости в зоне передачи усилия. Все это приводит к увеличению предельных возможностей процесса раздачи тонкостенных труб. Наружная трубная заготовка является чисто технологическим элементом, поэтому ее целесообразно изготавливать из пластичного, хорошо обрабатываемого материала. Таким материалом является, например, свинец. После деформирования наружная заготовка легко переплавляется для следующей операции. Автором заявляется, что в результате реализации данного процесса степень формоизменения увеличилась на 30% при раздаче трубы с внутренним диаметром 32 мм, с толщиной стенки 1,5 мм из коррозионностойкой стали 12Х18Н10Т. В качестве дополнительной заготовки использовалась труба из свинца с толщиной стенки 10 мм. Применение описанного способа в колесном производстве затруднено, так как в качестве заготовок для ободьев колес применяются цилиндры диаметром 270 – 1200 мм и изготовление свинцовых бандажей таких размеров потребует значительных капитальных затрат. Наиболее приемлемым методом увеличения степени деформации раздачей при средние и крупносерийном производстве ободьев колес, является создание подпора на торце заготовки, обеспечиваемое конструкцией инструмента.

Деформация раздачей цилиндрической заготовки обода усложняется наличием сварного шва. При раздаче наблюдается значительные деформации растяжения (утонение торца составляет 8 – 9%) [6]. Основной причиной разрушения заготовки в зоне сварного шва являются более низкие пластические и прочностные его характеристики по сравнению с основным металлом. Для ликвидации брака авторами [6] предложен способ раздачи с торцевым подпором, осуществляемый посредством передачи усилия на торец заготовки подпружиненными секторами,

которые установлены наклонно к оси пуансона в пуансонодержателе прессы. Недостатком способа является возможная потеря устойчивости заготовки в зоне передачи усилия. Для увеличения производительности процесса раздачи ее производят одновременно с двух сторон цилиндрической заготовки, что усиливает возможность складкообразования на свободной поверхности заготовки.

Обсуждение результатов. Результатом раздачи является получение конических раструбов на изначально цилиндрической заготовке, что может сопровождаться образованием складки в зоне передачи усилия, а также разрушением в виде образования трещины от торца.

Теоретическому анализу способа посвящен ряд работ [1, 7, 8], которые позволяют аналитически и численно рассчитать возникающие в заготовке напряжения в зависимости от технологических параметров и оценить возможности возникновения брака при раздаче. В тоже время, остается открытым вопрос определения зоны возможного образования складки на недеформированной части заготовки во время формообразования раздачей с торцевым подпором. Имея такие зависимости, позволяющие определять зону образования складок, можно применять укрепляющие наружные кольца вместо бандажей на всю длину заготовки, а также регулировать их положение относительно торца заготовки в зависимости от величины подпора, его наличия, технологических факторов процесса и механических характеристик материала.

В работе [7] на основании решения системы уравнений равновесия в цилиндрических координатах уравнения пластичности по гипотезе о максимуме касательных напряжений и граничными условиями $x=0, \sigma_x=0$ было получено решение для распределения меридиональных и тангенциальных напряжений во время раздачи

$$\sigma_x = -\sigma_s \frac{x^2}{r^2}, \quad (1)$$

$$\sigma_\theta = \sigma_s \left(1 - \frac{x^2}{r^2}\right), \quad (2)$$

при этом принимались следующие допущения – $\sigma_r=0$ ввиду малости, по сравнению с другими напряжениями и τ_{rx} не зависит от координаты r , но

зависит от толщины линейно: $\tau_{rx} = \frac{\tau_k x}{s}$, тогда

$$\frac{\partial \tau_{rx}}{\partial x} = \frac{\tau_k}{s} \text{ и } \tau_x = \frac{\sigma_\theta s}{r}; \tau_{rx} = \frac{\sigma_\theta x}{r},$$

где σ_x – напряжения, действующие по оси заготовки;

r – радиус заготовки,

x – координата в направлении оси заготовки,

σ_θ – тангенциальные напряжения,

s – толщина стенки заготовки.

В процессе приложения торцевого подпора, граничные условия изменяются: при $x=0$, $\sigma_x = -p_x$ где p_x – давление на краевую часть заготовки.

Тогда, подставляя в решение (1) новые граничные условия, получим

$$\sigma_x = -\sigma_s \frac{x^2}{r^2} - p_x, \quad (3)$$

$$\sigma_\theta = \sigma_s \left(1 - \frac{x^2}{r^2}\right) - p_x, \quad (4)$$

Найдем прогиб в зоне свободного изгиба в направлении радиуса заготовки, который появляется при действии выше полученных напряжений. Тангенциальная деформация равна:

$$\varepsilon_\theta = \frac{w}{R},$$

где w – прогиб заготовки в направлении радиуса.

Из связи напряжений и деформаций по деформационной теории пластичности при плоском напряженном состоянии:

$$\varepsilon_\theta = \frac{\varepsilon_i}{2\sigma_i} (2\sigma_\theta - \sigma_r). \quad (5)$$

Подставляя в данное уравнение значения напряжений из (3) и (4), перейдем к следующему выражению для прогиба:

$$w = \frac{r\sigma_s}{E} \left(1 - \frac{3x^2}{2r^2} - \frac{3p_x}{2\sigma_s}\right). \quad (6)$$

Полное выражение для прогиба с учетом краевого эффекта для оболочек будет иметь вид:

$$w = \frac{r\sigma_s}{E} \left(1 - \frac{3x^2}{2r^2} - \frac{3p_x}{2\sigma_s}\right) + e^{-\beta x} (A_1 \sin \beta x + A_2 \cos \beta x). \quad (7)$$

Тогда по аналогии с [9] находим постоянные из граничных условий $x=l+a$, $w=0$, $\frac{dw}{dx}=0$, где l – длина деформированного участка трубы, a – расстояние от зоны свободного изгиба до начала образования складки, и подставляя их в уравнение (7), определим параметра a .

$$a = \ln \frac{1}{\beta} \left(\frac{(R-r)E}{r\sigma_s \left(1 - \frac{3l^2}{2r^2} - \frac{3p_x}{2\sigma_s}\right)} - 1 \right), \quad (8)$$

Выводы. Анализ и сравнение полученных данных с аналогичными расчетами показывает [9], что граница образования складки смещается к месту свободного изгиба в случае наложения дополнительного торцевого подпора. Возникновение потери устойчивости происходит на некотором расстоянии от зоны свободного изгиба заготовки, которое будет зависеть от размеров заготовки, характерных для теории оболочек, предела текучести, модуля Юнга материала, коэффициента раздачи, а также величины давления на краю заготовки. Показано, что с увеличением степени деформации и

давления подпора зона образования складки смещается к месту свободного изгиба заготовки. Полученные данные можно использовать для интенсификации операции раздачи.

Список литературы

1. Інтенсифікація формуючих процесів холодного листового штампування: Монографія / О.В. Калюжний, В.Л. Калюжний. – К.: ТОВ «Сік Груп Україна», 2015. – 292 с.
2. Wang X. Effect of forming parameters on sheet metal stability during a rotary forming process for rim thickening / X. Wang, L. Li, L. Deng, J. Jin, Y. Hu // Journal of Materials Processing Technology. – 2015. – № 223, 262–273. – doi: 10.1016/j.jmatprot. 2015.04.009.
3. Guo Y.Q. Recent developments on the analysis and optimum design of sheet metal forming parts using a simplified inverse approach / Y.Q. Guo // Comput. Struct. – 2000. – № 78, с.133–148.
4. Еришов В.И. Совершенствование формоизменяющих операций листовой штамповки / В.И. Еришов, В.И. Глазков, М.Ф. Каширин. – М.: Машиностроение, 1990. – 312 с.
5. Пат. № 2158646 Россия МПК В 21 D 41/02. Способ раздачи концов труб / Меркулов В.И.; Марьин Б.Н.; Одинокое В.И.; Шпорт В.И.; Макаров К.А., (Россия). Заявл.: 11.08.1998; опубл.: 10.11.2000.
6. Проскуряков Г.В. Раздача сварных цилиндров с торцевым подпором / Г.В. Проскуряков, В.С. Фомин, Е.В. Якуничев // Автомобильная промышленность. – 1977. – № 9. – С. 34–35.
7. Пузырь Р.Г. Влияние геометрических параметров цилиндрической заготовки на напряженно-деформированное состояние при раздаче коническими пуансонами / Р.Г. Пузырь, О.В. Троцко, В.Ю. Черкаченко // Обработка материалов давлением: сборник научных трудов. – Краматорск: ДГМА, 2012. – № 4 (33). – С. 114–121
8. Beretta, S, Carboni, M, Machniewicz, T, Skorupa, M. Correlation between experiments and Strip Yield results on fatigue crack growth in a structural steel, *Proceedings ECF*, 2002, 14, Krakow, 46–57.
9. Пузырь Р.Г. Учет упрочнения металла при определении зоны возможной кольцевой потери устойчивости на первой операции раздачи при изготовлении ободьев колес / Р.Г. Пузырь, Л.Э. Дикая // Вестник Херсонского национального технического университета. – Херсон: ХНТУ. – 2015. – №3 (54). – С. 165–169.

Bibliography (transliterated)

1. *Intensyfikatsiya formoutvoryuyuchih protsesiv holodnogo listovogo shtampuvannya: MonografIya* [Intensification of processes formation forms cold sheet stamping: Monograph] / Kalyuzhny O.V., Kalyuzhny V.L. – Kiev: TOV "Sik Group Ukraine", 2015. – 292 p.
2. Wang X. Effect of forming parameters on sheet metal stability during a rotary forming process for rim thickening / X. Wang, L. Li, L. Deng, J. Jin, Y. Hu // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2015. – № 223. – pp. 262–273. – doi: 10.1016/j.jmatprot. 2015.04.009.
3. Guo Y.Q. Recent developments on the analysis and optimum design of sheet metal forming parts using a simplified inverse approach / Y.Q. Guo // *Comput. Struct.* – 2000. – No 78, P. 133–148.
4. Yershov V.I. *Sovershenstvovanie formoizmenyayuschih operatsiy listovoy shtampovki* [Improvement operations of changing shape sheet stamping] / V.I. Yershov, V.I. Glazkov, M.F. Kashirin. – Moscow: Mechanical engineering, 1990. – 312 p.
5. Patent No. 2158646 Russia МПК В 21 D 41/02. *Sposob razdachi kontsov trub* [Way of distribution of the ends Pipes] / Merkulov V.I.; Maryin B.N.; Is identical V.I.; Shport V.I.; Makarov K.A., (Russia). It is stated: 8/11/1998; it is published: 11/10/2000.
6. Proskuryakov G.V. *Razdacha svarnyih tsilindrov s tortseyvim podporom* [Distribution of welded cylinders with edge to skids] / G.V. Proskuryakov, V.S. Fomin, E.V. Yakunichyev // *Automotive industry*. – 1977. – No 9, pp. 34–35.
7. Puzyr R.G. *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] / R.G. Puzyr, O.V. Trotsko, V.Y. Cherkashchenko // *Processing of materials pressure: collection*

- of scientific works. – Kramatorsk: DGMA, 2012. – No 4 (33), pp. 114–121.
8. Beretta S, Carboni M, Machniewicz T, Skorupa M. Correlation between experiments and Strip Yield results on fatigue crack growth in a structural steel, *Proceedings ECF*, 2002, 14, Krakow, pp. 46–57.
9. Puzyr R.G. *Uchet uprochneniya metalla pri opredelenii zonyi vozmozhnoy koltsevoy poteri ustoychivosti na pervoy operatsii razdachi pri izgotovlenii obodev koles* [Accounting of hardening

metal when determining a zone of possible ring loss stability on the first operation of distribution at production of rims wheels] / R.G. Puzyr, L.E. Dikaya // *The Bulletin of the Kherson national technical university*. – Kherson: HNTU. – 2015. – No 3 (54), pp. 165–169.

Поступила (received) 14.11.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Інтенсифікація процесу роздавання циліндричної заготовки / Р. Г. Пузир, Р. В. Левченко, Ю. Б. Сіра // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 43 (1265). – С. 39–42. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2519-2671

Інтенсификация процесса раздачи цилиндрической заготовки / Р. Г. Пузырь, Р. В. Левченко, Ю. Б. Сирая // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 43 (1265). – С. 39–42. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2519-2671

Intensification of process distribution cylindrical preparation / R.G. Puzyr, R.V. Levchenko, Y. B. Siraya // *Bulletin of the NTU "KhPI"*. Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy. – Kh.: NTU "KhPI", 2017. – No. 43 (1265). – P. 39–42. – Bibliogr.: 8. – ISSN 2519-2671

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Пузир Руслан Григорович – доктор технічних наук, доцент, Коледж Кременчуцького національного університету; м. Кременчук, Україна; e-mail: puzyruslan@gmail.com

Пузырь Руслан Григорьевич – доктор технических наук, доцент, Колледж Кременчугского национального университета, г.Кременчуг, Украина; e-mail: puzyruslan@gmail.com

Puzyr Ruslan – Doctor of Technical Sciences, Docent, Associate Professor, College of the Kremenchuk national university, Kremenchuk, Ukraine; e-mail: puzyruslan@gmail.com

Левченко Роман Володимирович – кандидат технічних наук, Коледж Кременчуцького національного університету; м. Кременчук, Україна; e-mail: lrv78@i.ua

Левченко Роман Владимирович – кандидат технических наук, Колледж Кременчугского национального университета, г.Кременчуг, Украина; e-mail: lrv78@i.ua

Levchenko Roman – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), College of the Kremenchuk national university, Kremenchuk, Ukraine; e-mail: lrv78@i.ua

Сіра Юлія Борисівна – Коледж Кременчуцького національного університету, викладач, м. Кременчук, Україна; e-mail: julia_sobol@i.ua

Сирая Юлия Борисовна – Колледж Кременчугского национального университета, преподаватель, г. Кременчуг, Украина; e-mail: julia_sobol@i.ua

Siraya Yulia – College of the Kremenchuk national university, teacher. Kremenchuk, Ukraine; e-mail: julia_sobol@i.ua

УДК 621.771

А.А. САМСОНЕНКО, О.А. ПРЯДИЦЬКИЙ, О.М. КУЗЬМІНА, С.О. СУХОМЛИН

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ПРОКАТКИ ПРОСТИХ ПРОФІЛІВ
В СИСТЕМІ ПРИВІДНА-НЕПРИВІДНА КЛІТЬ

Проведено аналіз впливу різних деформаційних режимів прокатки в системі привідна-непривідна кліть на енергосилові параметри процесу. Експериментальна частина виконана на лабораторному стані 200 кафедри обробки металів тиском ім. акад. О.П.Чекмарьова НМетАУ. Розроблено математичну модель прокатки в горизонтальних приводних і вертикальних неприводних валках в ПЗ QForm VX і експериментально підтверджена її адекватність. При аналізі процесу використовували режими прокатки зі сполученням різних деформацій за висотою, шириною та зсувом вертикальних валків відносно положення горизонтальних у напрямку прокатки. Теоретичні та експериментальні дослідження показали збільшення максимальної сили прокатки на 10 ... 15%, при зміщенні холостих валків в напрямку прокатки, і максимального моменту на 50%.

Ключові слова: прокатка, привідна-непривідна кліть, сила прокатки, момент прокатки, обтиск, свинець.

Проведен анализ влияния различных деформационных режимов прокатки в системе приводная-неприводная клеть на энергосиловые параметры процесса. Экспериментальная часть проведена на лабораторном стане 200 кафедры обработки металлов давлением им. акад. А.П.Чекмарева НМетАУ. Разработана математическая модель прокатки в горизонтальных приводных и вертикальных неприводных валках в ПП QForm VX и экспериментально подтверждена ее адекватность. При анализе процесса использовали режимы прокатки с сочетанием различных деформаций по высоте, ширине и смещением вертикальных валков относительно положения горизонтальных в направлении прокатки. Теоретические и экспериментальные исследования показали увеличение максимальной силы прокатки на 10...15%, при смещении холостых валков в направлении прокатки, и максимального момента на 50%.

Ключевые слова: прокатка, приводная-неприводная клеть, сила прокатки, момент прокатки, обжатия, свинец.

The effect of various deformation modes of rolling in the drive-and-non-drive cage system on the energy-force parameters of the process is analyzed. The purpose of this study was to conduct a theoretical and experimental analysis of the rolling process using a cassette with non-driven vertical rolls, in particular – the influence of rolling parameters on the power-energy parameters of the process. The experimental part was carried out on a laboratory mill 200 of the metal forming department named by acad. O.P. Chekmaryov NMetAU. A mathematical model of rolling in horizontal drive and vertical non-drive rolls in the QForm VX has been developed and its adequacy has been experimentally confirmed. The data on energy consumption during the rolling process using a cassette with non-driven rolls is obtained experimentally and theoretically. Comparison of data showed that the values obtained qualitatively coincide, the quantitative difference is not more than 15%. In the analysis of the process, rolling regimes were used, with various deformations in height, width, and displacement of the vertical rolls relative to the horizontal position in the rolling direction. Theoretical and experimental studies showed an increase in the maximum rolling force by 10 ... 15%, with the displacement of non-drive rolls in the rolling direction, and the maximum rolling torque by 50%.

Keywords: rolling, drive/non-drive mill, rolling force, rolling torque, impression, lead.

Вступ. Безперервні стани є найбільш сучасними з існуючих традиційних прокатних станів. Їх характеризують високі швидкості прокатки, що дозволяють досягати максимальної серед усіх видів станів продуктивності. Між використовуваних у безперервних станах клітей найбільш розповсюджені кліті у безперервних станах є двохвалкові нереверсивні [1].

Жорсткі умови сьогодення, в тому числі щодо енергетичних ресурсів, особливо урахуванням змін в економіці останніх трьох років, вимагають пошуку прихованих резервів енергозбереження та шляхів їх максимального використання у всіх виробництвах [2]. Для прокатного виробництва, якому притаманна велика питома частка енерговитрат у собівартості готової продукції, питання енергозбереження дуже актуальне. Особливе значення мають дослідження, що спрямовані на використання внутрішнього потенціалу процесу, за рахунок якого без великих додаткових витрат можна отримати значну економію енергетичних ресурсів.

Наприклад, однією з особливостей процесу прокатки є те, що потужність, необхідна для деформування металу, підводиться від валків до заготовки за допомогою тертя на контакті [3]. Чим повніше використовуються можливості сил тертя для передачі потужності, тим вище ефективність використовуваного обладнання і менше енерговитрати. Однак різні силові умови в момент захоплення металу валками і на сталій стадії процесу

не дозволяють в повній мірі використовувати потенціал сил тертя на контактній поверхні для передачі корисної потужності, що знижує коефіцієнт корисної дії (ККД) процесу. Це протиріччя спеціалісти з прокатного виробництва вирішують, наприклад, за допомогою розробки системи прокатки у триосередковому модулі, який складається з двох приводних клітей з загальним двигуном та непривідної кліті, яка встановлена між ними [4-6].

Такий технологічний процес має ряд переваг у порівнянні з традиційним процесом:

– економія енергії, яку зумовлює два фактори, а саме: поліпшення використання енергії, яка подається приводними валками в осередок деформації у зв'язку з відбором частини її резерву для здійснення додаткової роботи деформації в неприводних клітях, та зниження витрат потужності на роботу холостого ходу і витрат в трансмісії приводу прокатних валків у зв'язку з відсутністю його у неприводних клітей;

– технологічна гнучкість прокатних станів, яка зумовлюється наявністю легких компактних неприводних клітей та інших засобів деформації металу з непривідним робочим інструментом того чи іншого виконання, які, в залежності від поставлених технологічних завдань, встановлюються в міжклітьових проміжках лінії безперервного сортового стану і дозволяють вирішувати практично будь-які питання виробництва прокату широкого розмірного і марочного сортаменту, наприклад, здійснювати контроль розмірів розкату при прокатці

смугових і кутових профілів, фланцевих профілів, гибочно-калібрувальні функції при виробництві прокату різного призначення, кантувати заготовку між клітьми, виконувати його поздовжнє поділ і т.д., а також поєднувати ці функції [7].

Оцінка можливостей енергозбереження проводилася на безперервному середньосортному стані 450 АТ «Євраз ЗСМК» [8]. У першій чорновій безперервній групі, що складається з трьох клітей, при прокатці кутика № 10 за існуючим калібруванням відключили привод другої кліті, деформування у якій відбувалось за рахунок використання резерву сил тертя першої і третьої кліті. Було встановлено, що заміна однієї приводної кліті на неприводну дозволяє знизити питомі витрати електроенергії на 0,75 кВт·год/т.

Прокатка в неприводних клітьх реалізується за рахунок резерву сил тертя розташованих поруч приводних клітей. Визначення перспектив енергозбереження суміщеного процесу прокатки-розділення неприводним ділильним інструментом досліджувалося на безперервному дрібносортовому стані 250-1 сортопрокатного цеху АТ «Євраз ЗСМК» при реалізації даного процесу в чистовій групі клітей. Проведені експерименти показали, що за рахунок поздовжнього поділу смуги на дві частини в чистовій групі з'явилася можливість при прокатці арматури № 10 з одного боку знизити швидкість прокатки з 17 м/с до 12 м/с, при цьому збільшивши продуктивність на 30% [9].

У джерелі [10] наводяться результати застосування касет з неприводними вертикальними валками при прокатці двотаврових балок і швелерів різних перерізів. Пропонована технологія дозволяє зменшити витрату валків, електроенергії, зменшити витрату валків, електроенергії, поліпшити структуру металу, підвищити точність і якість готової продукції.

Успішне застосування касет з вертикальними валками при прокатці двотаврових балок дозволило розробити і впровадити технологію прокатки швелерів з паралельними полками. В результаті усунули кантовку прокату перед чистовим калібром, що спричинило зниження витрат на електроенергію на рівні 25 – 30% [12-14]. Проведена дослідна прокатка з використанням таких касет на безперервному сортовому стані 250 МК «Криворіжсталь» для прокатки круглої сталі Ø20 мм показала доцільність їх застосування.

Як видно з наведеного огляду, комбінація приводних та неприводних клітей дозволяє отримати значну економію енергії без втрати якості продукції. Тому подібне рішення було б доцільно розглянути при виробництві сортових профілів. Для прискорення процесу розробки/удосконалення технології потрібно перевірити можливість адекватно моделювати процес за допомогою програми чисельного моделювання.

Метою даного дослідження було проведення теоретичного та експериментального аналізу процесу прокатки з використанням касети з неприводними вертикальними валками, зокрема – вплив параметрів прокатки на енергосилові показники процесу.

Дослідження проводилися на лабораторному стані 200 кафедри обробки металів тиском ім. акад. О.П.Чекмарьова Національної Металургійної Академії України (м.Дніпро). Реверсивний стан 200 (рис. 1) містить робочу кліть і лінію приводу робочих валків, що складається з універсальних шпинделів, шестеренної кліті, коробки передач, редуктора, з'єднувальних муфт та електродвигуна. Станина відкритого типу, верхні поперечини до станини кріпляться шпильками. Привод валків здійснюється від електродвигуна трифазного змінного струму потужністю 30 кВт, наявність коробки передач в лінії стану дозволяє регулювати число обертів в межах від 2,8 до 52 об/хв.



Рис. 1 – Загальний вид стану 200



Рис. 2 – Касета з неприводними валками

В якості вимірювального інструменту використовували електронний штангенциркуль Mitutoyo з точністю вимірювання до 0,01 мм (DIN 862: 1988), а також вимірювальну лінійку.

Вимірювання сили і моменту прокатки проводилися з використанням датчиків опору (месдоз) з максимальним навантаженням 50 кН. Передача даних на комп'ютер здійснювалася через аналогово-цифровий перетворювач (АЦП) WAD-AIK-BUS-Tenso (табл. 1), дані з якого оброблялися в програмному забезпеченні Synchronous.

Таблиця 1 – Основні технічні характеристики АЦП

№ п/п	Основні технічні характеристики	
1.	Кількість каналів	4
2.	Діапазон зміни вхідного сигналу	+/- 15 мВ
3.	Основна, наведена до діапазонів перетворення, похибка	+/- 0,1 %
4.	Похибка нелінійності	+/- 0,02 %
5.	Зниження перешкоди загального вигляду 50/60 Гц	не менше 120 дБ
6.	Зниження перешкоди нормального вигляду 50/60 Гц	не менше 70 дБ
7.	Зниження зміни напруги живлення	не менше 150 дБ
8.	Рівень шумів вимірювальних каналів	не більше 90дБ
9.	Додаткова похибка в робочому діапазоні температур	+/- 0,002%*°C
10.	Захист входу від перенапруження довгострокова	до +/- 60В
11.	Частота вимірів	400 Гц

В ході експерименту касету з неприводними вертикальними валками встановлювали між приводними горизонтальними валками кліті (рис. 2, 3). Швидкість обертання валків складала 32 об/хв; довжина і діаметр горизонтальних валків відповідно 100 мм та 200 мм, а вертикальних – 23 мм та 80 мм. Використовувалася свинцева заготовка циліндричної форми діаметром 30,5 мм та довжинами 100 мм, 150 мм і 200 мм. Прокатка проводилась у прямокутних калібрах. Налаштування режимів обтисків виконувалось вручну, за допомогою натискних гвинтів та ексцентрикового механізму касети.



Рис. 3 – Робочий вид кліті з встановленою касетою

В процесі дослідження варіювались 3 фактори: обтиснення в горизонтальних валках, обтиснення в вертикальних валках, зміщення осі неприводних валків у напрямку прокатки. Деформація здійснювалася при кімнатній температурі. Використовувалися режими прокатки з таким сполученням деформаційних параметрів (перша

цифра – обтиснення в горизонтальних валках, %; друга цифра – обтиснення в вертикальних валках, %; третя цифра – зміщення осі неприводних валків у напрямку прокатки, мм): 1) 24-10-50, 2) 10-10-50, 3) 24-10-0, 4) 10-10-0, 5) 24-20-50, 6) 10-20-50, 7) 24-20-0, 8) 10-20-5 (рис. 4, табл. 2).



а



б

Рис. 4 – Загальний вигляд отриманих зразків:
а – вид збоку, б – вид зверху)

Результати експериментальних досліджень наведені у табл. 2.

Таблиця 2 – Результати експериментальних досліджень прокатки в системі приводна-неприводна кліть

№	Режими прокатки: обтиснення (%) – поширення (%) – зсув (мм)	Діаметр і довжина вихідної заготовки, мм	Розміри заготовки після прокатки		Коефіцієнт втяжки, λ	Максимальна сила прокатки, Н	Сила при сталому процесі, Н
			Висота, мм	Ширина, мм			
1	24-10-50	D=30,5; L=200	25,1	27,6	1,07	25000	8333
2	10-10-50	D=30,5; L=150	28,4	27,3	1,04	25700	4177
3	24-10-0	D=30,5; L=100	23,0	27,6	1,14	27600	8038
4	10-10-0	D=30,5; L=150	27,8	27,6	1,05	16400	2977
5	24-20-50	D=30,5; L=150	26,8	24,6	1,08	27600	9042
6	10-20-50	D=30,5; L=150	29,5	24,3	1,08	19600	4967
7	24-20-0	D=30,5; L=100	23,0	24,4	1,3	16000	7496
8	10-20-0	D=30,5; L=200	26,6	24,4	1,2	20000	3340

Обробка даних експерименту за методикою ПФЕ 2^3 [15] дозволила отримати такі рівняння регресії:

для сили прокатки при сталому процесі, кН:

$$Y_1 = 5,24175 + 1,73650X_1 - 0,63950 \cdot X_2 + 1,38800 \cdot X_3; \quad (1)$$

для максимальної сили прокатки, кН:

$$Y_2 = 16,19075 + 5,80875 X_1 - 0,43425 X_2 + 1,24075 X_3, \quad (2)$$

де X_1 – обтиск за висотою [10;24], %; X_2 – обтиск за шириною [10;20], %; X_3 – зміщення осі несприяданих валків за ходом прокатки [0; 50], мм.

Наочно динаміку зміни сили при зміні обтиску по висоті та незмінних інших параметрах демонструють графіки на рис. 5–7.

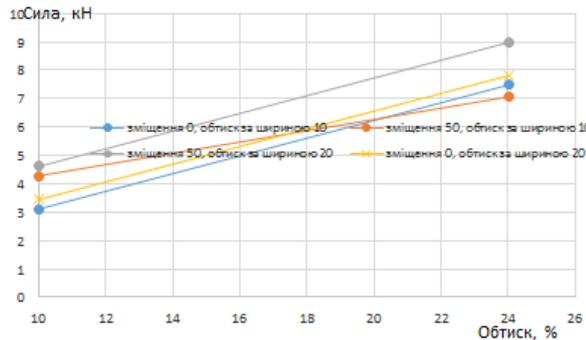


Рис. 5 – Апроксимація експериментальних даних із залежності сили прокатки від відносного обтиску

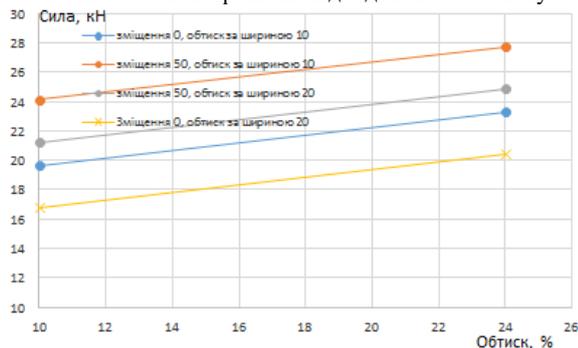


Рис. 6 – Апроксимація експериментальних даних із залежності максимальної сили прокатки від відносного обтиску

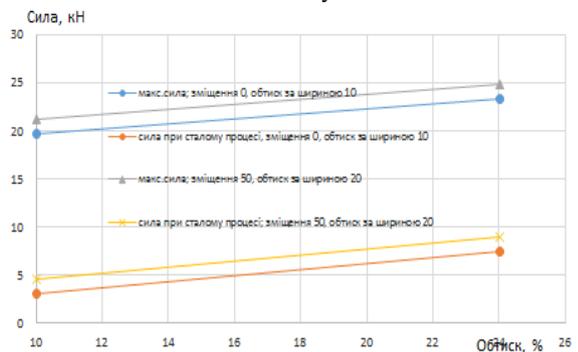


Рис. 7 – Порівняння експериментальних даних: максимальна сила прокатки та сила прокатки при сталому процесі залежно від висотного обтиску

Теоретичне дослідження було проведене за допомогою програми QFORM VX [15]. Оскільки задача є симетричною, моделювання здійснювали для однієї чверті перерізу – з метою зменшення витрат часу. Загальний вигляд моделі при сталому процесі наведено на рис. 8. Генерація і перебудова скінченно-

елементної сітки в процесі розрахунку здійснюються в автоматичному режимі.

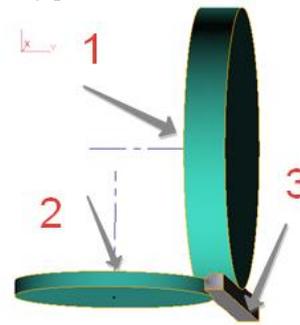


Рис. 8 – Загальний вигляд розрахункової 3D-моделі (1/4 частина) 1 – привідний валок, 2 – несприяданий валок, 3 – свинець.

Основні параметри процесу: холодна прокатка; матеріал заготовки – свинець С1; матеріал валків – сталь 40Х; тертя задавалося відповідно до закону Зібеля, показник тертя склав 0,4 для всіх валків; швидкість обертання валків складала 32 об/хв, температура валків і заготовки 22°C.

Після проведення моделювання всіх режимів обтиску були отримані такі дані: момент (рис. 9 а, б) та сила прокатки (рис. 10 а, б) приводних і несприяданих валків, розподіл температур у осередку деформації (рис. 11).

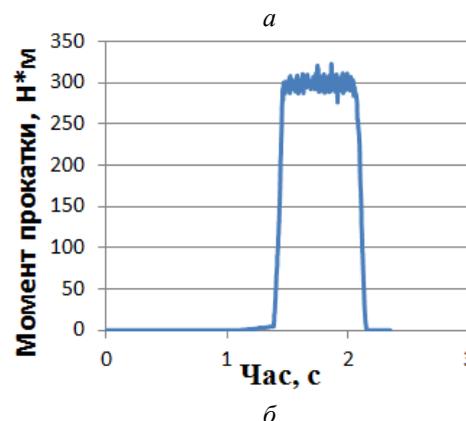
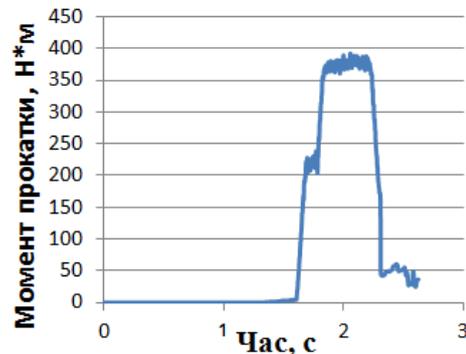


Рис. 9 – Зміна моменту прокатки приводного валка: а – зі зміщенням осі та б – без зміщення у часі

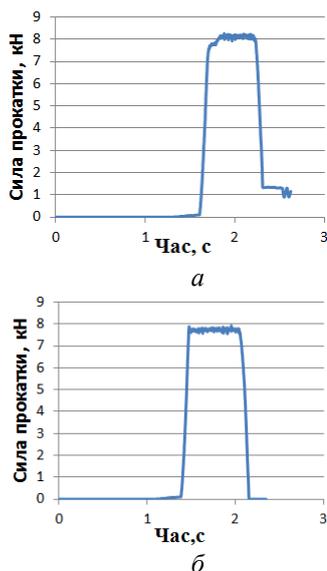


Рис. 10 – Зміна сили прокатки приводного валка:
а – зі зміщенням вісі та б – без зміщення у часі

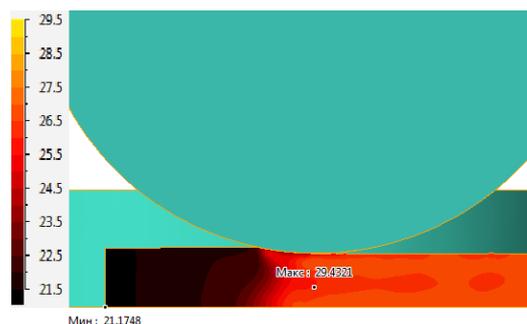


Рис. 11 – Розподіл температурних шарів

На графіках зміни сили прокатки видно, що при зміщенні вісі є невелика сходинка з меншим моментом; це пояснюється тим, що на першому етапі зразок спочатку прокатується у приводних валках, а потім у неприводних. За рахунок того, що приводні валки діяли як заштовхувач, сила прокатки збільшувалась. Максимальна температура для всіх режимів прокатки складала не більше 27°C. Отримані результати представлені у табл. 3.

Таблиця 3 – Результати моделювання прокатки в QForm

№	Режими прокатки: обтиснення (%) – поширення (%) – зсув (мм)	Початкові розміри заготовок, мм	Момент прокатки, Н·м	Сила прокатки на приводному валку, Н	Сила прокатки на неприводному валку, Н
1	24-10-50	D=30,5;L=200	375	8120	5763
2	10-10-50	D=30,5;L=150	192	4356	4853
3	24-10-0	D=30,5;L=100	303	7510	3433
4	10-10-0	D=30,5;L=150	124	3287	3114
5	24-20-50	D=30,5;L=150	556	8842	8290
6	10-20-50	D=30,5;L=150	340	5162	7490
7	24-20-0	D=30,5;L=100	364	7742	5681
8	10-20-0	D=30,5;L=200	254	3780	5926

Порівняння геометричних розмірів отриманих в ході експерименту зразків з результатами моделювання показало гарне якісне співпадіння. А порівняння значень сил прокатки на приводному валку експериментальних даних та з моделювання показало допустиму відносну різницю між результатами експерименту та моделювання на рівні 15 % (табл. 4).

Зміщення неприводних валків відносно приводних за ходом прокатки призводить до росту

сили та моменту прокатки. Найбільший вплив при цьому має ступінь деформації у приводних валках: підвищення обтиску у приводних валках на 15% збільшує силу прокатки практично у 2 рази, а момент прокатки у 1,5–2 рази. При наявності зміщення валків зростання обтиску у неприводних валках на 10% підвищує силу прокатки на 15%, а момент прокатки приблизно на 50 %.

Таблиця 4 – Порівняння результатів експерименту та моделювання

№	Режими прокатки, висота, % ширина, % зсув, мм	Сила прокатки на приводному валку (експерим.), Н	Сила прокатки на приводному валку (модел.), Н	Відносна різниця сил прокатки експериментальних та при моделюванні, %	Сила прокатки на неприводному валку (модел.), Н	Момент прокатки (модел.), Н·м
1	24-10-50	8333	8120	2	5763	375
2	10-10-50	4177	4356	4	4853	192
3	24-10-0	8038	7510	6	3433	303
4	10-10-0	2977	3287	10	3114	124
5	24-20-50	9042	8842	2	8290	556
6	10-20-50	4967	5162	3	7490	340
7	24-20-0	7496	7742	3	5681	364
8	10-20-5	3340	3780	13	5926	254

Висновки

1. Проведено експериментальний та теоретичний (за допомогою програми QForm VX) аналіз процесу прокатки циліндричної заготовки з використанням касети з неприводними валками. При аналізі процесу використовували режими прокатки зі сполученням різних деформацій за висотою, шириною та зсувом вертикальних валків відносно положення горизонтальних у напрямку прокатки.

2. Отримані дані щодо витрат енергії при проведенні процесу прокатки з використанням касети з неприводними валками експериментальним та теоретичним шляхом. Порівняння даних показало, що отримані величини якісно співпадають, кількісна відмінність складає не більше 15 %.

3. Підвищення обтиску у приводних валках на 15% збільшує силу прокатки практично у 2 рази, а момент прокатки у 1,5–2 рази. Підвищення обтиску у неприводних валках на 10% збільшує силу прокатки на 15%, а момент прокатки приблизно на 50 %..

Список літератури

1. *Зотов В.Ф.* Производство проката – М. : Интернет Инжиниринг, 2000.
2. Підвищення енергоефективності як стратегічний пріоритет державної політики економічної безпеки. Аналітична доповідь. – Національний інститут стратегічних досліджень. Відділ енергетичної та ядерної безпеки. Київ, 2012. – http://www.niss.gov.ua/content/articles/files/1218_Dopovid-3b93c.pdf.
3. *Грудев А.П., Машикин Л.Ф., Ханін М.І.* Технология прокатного производства Учебник для вузов. – М.: Металлургия, 1994. – 656 с.
4. Конструктивное исполнение трехочагового прокатного модуля в линии непрерывного сортового стана / С.М. Жучков, П.В. Токмаков, А.И. Лещенко, С.И. Бадюк // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: Сб. научн. тр. – Дніпропетровськ.: ІЧМ НАН України, 2009. – Вип. 20. – С. 162–167.*
5. Особенности конструкции и результаты испытаний экспериментального образца неприводной рабочей клетки мелкосортно-проволочного стана 250/150-6 / С.М. Жучков, Л.В. Кулаков, А.П. Лохматов, А.И. Лещенко // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: Сб. научн. тр. – Дніпропетровськ.: ІЧМ НАН України, 2006. – Вип. 12. – С. 204–212.*
6. Анализ результатов работы Института черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины в 2008 г. / В.И. Большаков, С.М. Жучков // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: Сб. научн. тр. – Дніпропетровськ.: ІЧМ НАН України, 2009. – Вип. 19. – С. 13–39.*
7. Исследование и разработка технологии непрерывной прокатки с использованием неприводной рабочей клетки в черновой группе мелкосортно-проволочного стана / С.М. Жучков, А.П. Лохматов, П.В. Токмаков и др. // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: Сб. научн. тр. – Дніпропетровськ.: ІЧМ НАН України, 2006. – Вип. 13. – С. 99–105.*
8. Информационно-аналитическая система непрерывной сортовой прокатки / С.М. Жучков, Д.Г. Паламарь, В.Г. Раздобрев, А.П. Иванов, А.И. Лещенко // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: Сб. научн. тр. – Дніпропетровськ.: ІЧМ НАН України, 2009. – Вип. 19. – С. 166–173.*
9. Обоснование методики расчета силовых параметров при прокатке в трехочаговом прокатном модуле / С.М. Жучков, А.А. Горбанев, Б.Н. Колосов, П.В. Токмаков // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: Сб. научн. тр. – Дніпропетровськ.: ІЧМ НАН України, 2005. – Вип. 11. – С. 130–141.*

10. Процессы деформации металла на основе многовалковых калибров / И. К. Огинский, В. Н. Данченко, А. А. Самсоненко, В. В. Бояркин. – Днепропетровск : Пороги, 2011. – 350 с. – ISBN 978-617-518-161-4.
11. Модернизация среднесортных прокатных станов с применением четырехвалковых калибров, образованных с помощью кассет с неприводными вертикальными валками / В.Н. Гринавцев, В.С. Попов, А.А. Витушко // *Вестник Липецкого государственного технического университета.* – 2016. – 1(27). – С. 31–33.
12. Фастыковский А.Р. Увеличение эффективности прокатного оборудования за счет использования резервных сил трения очага деформации // *Известия вузов. Машиностроение.* – 2003. – № 6. – С. 59–63.
13. Моделирование напряженно-деформированного состояния элементов кассет с неприводными вертикальными валками для чистовых клетей сортовых станов / В. С. Медведев, Е. В. Базарова, А. А. Чичкан, В. А. Шпаков/ *ISSN 2079-5459. Вісник НТУ «ХП».* 2013. № 43 (1016).
14. Прокатка двугавровых балок на стане 650 с применением кассет с неприводными валками / В.Л. Барбаров [и др.] // *Сталь.* – 1976. – №5. – С. 432–435.
15. Новик Ф.С., Арсов Я.Б. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов – М.: Машиностроение, 1980. – 304 с.
16. <http://www.qform3d.com>

Bibliography (transliterated)

1. Zotov V.F. *Proizvodstvo prokata* – Moscow : Internet Inzhiniring, 2000.
2. *Pidvishchennya energoefektivnosti yak strategichnij prioritet derzhavnoї politiki ekonomichnoї bezpeki. Analitichna dopovid'.* – Nacional'nij institut strategichnih doslidzen'. Viddil energetichnoї ta yadernoї bezpeki. Kiїv, 2012. – http://www.niss.gov.ua/content/articles/files/1218_Dopovid-3b93c.pdf.
3. *Grudev A.P., Mashkin L.F., Hanin M.I. Tekhnologiya prokatnogo proizvodstva* Uchebnik dlya vuzov. – Moscow: Metallurgiya, 1994. – 656 p.
4. *Konstruktivnoe ispolnenie trekhochagovogo prokatnogo modulya v linii nepreryvnogo sortovogo stana* / S.M. Zhuchkov, P.V. Tokmakov, A.I. Leshchenko, S.I. Badyuk // *Fundamental'nye i prikladnye problemy chernoj metallurgii: Sb. nauchn. tr. – Dnipropetrovs'k.: ICHM NAN Ukraїni, 2009. – Vip. 20. – P. 162–167.*
5. *Osobennosti konstrukcii i rezul'taty ispytanj ehksperimental'nogo obrazca neprivodnoj rabochej kleti melkosortno-provolochnogo stana 250/150-6* / S.M. Zhuchkov, L.V. Kulakov, A.P. Lohmatov, A.I. Leshchenko // *Fundamental'nye i prikladnye problemy chernoj metallurgii: Sb. nauchn. tr. – Dnipropetrovs'k.: ICHM NAN Ukraїni, 2006. – Vip. 12. – P. 204–212.*
6. *Analiz rezul'tatov raboty Instituta chernoj metallurgii im. Z.I. Nekrasova NAN Ukrainy v 2008 g.* / V.I. Bol'shakov, S.M. Zhuchkov // *Fundamental'nye i prikladnye problemy chernoj metallurgii: Sb. nauchn. tr. – Dnipropetrovs'k.: ICHM NAN Ukraїni, 2009. – Vip. 19. – P. 13–39.*
7. *Issledovanie i razrabotka tekhnologii nepreryvnoj prokatki s ispol'zovaniem neprivodnoj rabochej kleti v chernovoj gruppe melkokosortno-provolochnogo stana* / S.M. Zhuchkov, A.P. Lohmatov, P.V. Tokmakov i dr. // *Fundamental'nye i prikladnye problemy chernoj metallurgii: Sb. nauchn. tr. – Dnipropetrovs'k.: ICHM NAN Ukraїni, 2006. – Vip. 13. – P. 99–105.*
8. *Informacionno-analiticheskaya sistema nepreryvnoj sortovoj prokatki* / S.M. Zhuchkov, D.G. Palamar', V.G. Razdobreev, A.P. Ivanov, A.I. Leshchenko // *Fundamental'nye i prikladnye problemy chernoj metallurgii: Sb. nauchn. tr. – Dnipropetrovs'k.: ICHM NAN Ukraїni, 2009. – Vip. 19. – P. 166–173.*
9. *Obosnovanie metodiki rascheta silovyh parametrov pri prokatke v trekhochagovom prokatnom module* / S.M. Zhuchkov, A.A. Gorbanev, B.N. Kolosov, P.V. Tokmakov // *Fundamental'nye i prikladnye problemy chernoj metallurgii: Sb. nauchn. tr. – Dnipropetrovs'k.: ICHM NAN Ukraїni, 2005. – Vip. 11. – P. 130–141.*
10. *Processy deformacii metalla na osnove mnogovalkovykh kalibrov* / I. K. Oginskij, V. N. Danchenko, A. A. Samsonenko,

- V. V. Boyarkin. – Dnepropetrovsk : Porogi, 2011. – 350 p. – ISBN 978-617-518-161-4.
11. Modernizatsiya srednesortnykh prokatnykh stanov s primeneniem chetyrekhvalkovykh kalibrov, obrazovannykh s pomoshch'yu kasset s neprivodnymi vertikal'nymi valkami / V.N. Grinavcev, V.S. Popov, A.A. Vitushko // Vestnik lipeckogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2016. – 1(27). – P. 31–33.
 12. Fastykovskij A.R. Uvelichenie ehffektivnosti prokatnogo oborudovaniya za schet ispol'zovaniya rezervnykh sil treniya ochaga deformatsii // Izvestiya vuzov Mashinostroenie. – 2003. – No 6. – P. 59–63.
 13. Modelirovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya ehlementov kasset s neprivodnymi vertikal'nymi valkami dlya chistovykh kletej sortovykh stanov / V. S. Medvedev, E. V. Bazarova, A. A. Chichkan, V. A. Shpakov/ ISSN 2079-5459. Visnik NTU «HPI». 2013. No 43 (1016).
 14. Prokatka dvutavrovyykh balok na stane 650 s primeneniem kasset s neprivodnymi valkami / V.L. Barbarov [i dr.] // Stal'. – 1976. – No 5. – P. 432–435.
 15. Novik F.S., Arsov YA.B. Optimizatsiya processov tekhnologii metallov metodami planirovaniya ehksperimentov – Moscow: Mashinostroenie, 1980. – 304 p.
 16. <http://www.qform3d.com>

Надійшла (received) 20.10.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic description

Дослідження процесу прокатки простих профілів в системі приводна-неприводна кліть / А.А. Самсоненко, О.А. Прядицький, О.М. Кузьміна, С.О. Сухомлин // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – № 43 (1265). – С. 43–49. – Бібліогр.: 16 назв. – ISSN 2519-2671

Исследование процесса прокатки простых профилей в системе приводная-неприводная клеть / А.А. Самсоненко, А.А. Прядицький, О.М. Кузьміна, С.А. Сухомлин // Вестник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – № 43 (1265). – С. 43–49. – Библиогр.: 16 назв. – ISSN 2519-2671

Investigation of the rolling process of simple profiles in the drive-non-driven rolling mill system / A. Samsonenko, O. Pryaditsky, O. Kuzmina, S. Sukhomlin // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Innovative technologies and equipment for processing materials in engineering and metallurgy. – Kharkov: NTU "KhPI", 2017. – No 43 (1265). – P. 43–49. – Bibl: 16. – ISSN 2519-2671

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Самсоненко Андрій Анатолійович – доцент, к.т.н., кафедра ОМТ, Національна металургійна академія України, м.Дніпро, тел. (0562) -465342 (кафедра), e-mail: samsonenko@metal-forming.org

Самсоненко Андрей Анатольевич – доцент, к.т.н., кафедра ОМД, Национальная металлургическая академия Украины, г.Днепр, тел. (0562)-465342 (кафедра), e-mail: samsonenko@metal-forming.org

Samsonenko Andrii – Associate Professor, PhD, Metal Forming Department, National Metallurgical Academy of Ukraine, Dnipro, tel. (0562) -465342 (department), e-mail: samsonenko@metal-forming.org

Прядицький Олексій Альбертович – аспірант кафедри ОМТ, Національна металургійна академія України, м.Дніпро, тел. (0562) -465342 (кафедра), e-mail: Lyavoshka@gmail.com

Прядицкий Алексей Альбертович – аспірант кафедри ОМД, Национальная металлургическая академия Украины, г.Днепр, тел. (0562)-465342 (кафедра), e-mail: Lyavoshka@gmail.com

Pryadytskyi Oleksii – post-graduate student, Metal Forming Department, National Metallurgical Academy of Ukraine, Dnipro, tel. (0562) -465342 (department), e-mail: Lyavoshka@gmail.com

Кузьміна Ольга Михайлівна – доцент, к.т.н., кафедра ОМТ, Національна металургійна академія України, м.Дніпро, тел. (0562) -465342 (кафедра), e-mail: kuzmina@metal-forming.org

Кузьмина Ольга Михайловна – доцент, к.т.н., кафедра ОМД, Национальная металлургическая академия Украины, г.Днепр, тел. (0562)-465342 (кафедра), e-mail: kuzmina@metal-forming.org

Kuzmina Olha – Associate Professor, PhD, Metal Forming Department, National Metallurgical Academy of Ukraine, Dnipro, tel. (0562) -465342 (department), e-mail: kuzmina@metal-forming.org

Сухомлин Станіслав Анатолійович – начальник прокатного цеху №1 ЧАО «Євраз-ДМЗ», e-mail: Stanislav.Sukhomlin@evraz.com

Сухомлин Станіслав Анатолійович – начальник прокатного цеху №1 ПрАТ «Євраз-ДМЗ», e-mail: Stanislav.Sukhomlin@evraz.com

Sukhomlyn Stanislav – chief of rolling mill №1, «Evraz DMZ» company, e-mail: Stanislav.Sukhomlin@evraz.com

УДК 621.771.63

В.П. СВИДЕРСКИЙ, А.Ф. ДОРОВСКОЙ

ОЦЕНКА И УПРАВЛЕНИЕ РИСКОМ ПРИ ВНЕДРЕНИИ НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Жизнедеятельность современного общества, его устойчивость и способность развиваться определяется многими факторами, главными из которых являются информационные процессы, инновации, технологический уровень и состояние производства. Опыт стран с развитой рыночной экономикой доказывает, что разработка и внедрение новых технологий являются важнейшими условиями функционирования предприятий в среде конкуренции и свободных рыночных отношений. В сложившейся в Украине ситуации глобальной экономической проблемой следует считать восстановление производства на основе внедрения новых технологий. Воплощение технологической модели не может обойтись без трудовых ресурсов. Важной особенностью высоких технологий является их интегрированность в ряд совмещенных процессов. Ни одна из высоких технологий не может быть создана, а также успешно управляться без сочетания ее с процессом новых информационных и коммуникационных технологий. В работе технологический риск рассмотрен в качестве вероятности потери предприятием части собственных ресурсов, или появления дополнительных расходов в результате разработки и внедрения технологических новшеств. В статье на основе анализа логистической кривой (кривой Гомпертца) рассмотрено значение влияния новых технологий на эффективность функционирования предприятий. В работе установлено, что невозможно сформулировать единственный критерий допустимого риска для всех видов техники и технологий. Проанализированы существующие способы минимизации некоторых видов риска. Проведен анализ технологического риска. Предложены пути управления рисками, связанными с новыми технологиями.

Ключевые слова: новые технологии, инновации, технологический риск, управление рисками.

Життєдіяльність сучасного суспільства, його стійкість і здатність розвиватися визначається багатьма факторами, головними з яких є інформаційні процеси, інновації, технологічний рівень і стан виробництва. Досвід країн з розвинутою ринковою економікою доводить, що розробка і впровадження нових технологій є найважливішими умовами функціонування підприємств в середовищі конкуренції і вільних ринкових відносин. У ситуації, що в Україні ситуації глобальної економічної проблемою слід вважати відновлення виробництва на основі впровадження нових технологій. Втілення технологічної моделі не може обійтися без трудових ресурсів. Важливою особливістю високих технологій є їх інтегрованість в ряд суміщених процесів. Жодна з високих технологій не може бути створена, а також успішно справлятися без поєднання її з процесом нових інформаційних і комунікаційних технологій. В роботі технологічний ризик розглянутий як ймовірність втрати підприємством частини своїх ресурсів, або появи додаткових витрат у результаті розробки і впровадження технологічних нововведень. У статті на основі аналізу логістичної кривої (кривої Гомпертца) розглянуто значення впливу нових технологій на ефективність функціонування підприємств. У роботі встановлено, що неможливо сформулювати єдиний критерій допустимого ризику для всіх видів техніки і технологій, Проаналізовано існуючі способи мінімізації деяких видів ризику. Проведено аналіз технологічного ризику. Запропоновано шляхи управління ризиками, пов'язаними з новими технологіями.

Ключові слова: нові технології, інновації, технологічний ризик, управління ризиками.

The life activity of modern society, its stability and the ability to develop is determined by many factors, the main of which are information processes, innovations, technological level and the state of production. The experience of countries with developed market economies proves that the development and introduction of new technologies are the most important conditions for the functioning of enterprises in a competitive environment and free market relations. In the current situation in Ukraine, the global economic problem should be considered the restoration of production on the basis of the introduction of new technologies. The embodiment of a technological model can not do without human resources. An important feature of high technologies is their integration into a number of combined processes. None of the high technologies can be created, and successfully managed without combining it with the process of new information and communication technologies. In work, technological risk is considered as the probability of the enterprise losing part of its own resources, or the emergence of additional costs as a result of the development and introduction of technological innovations. In the article, based on the analysis of the logistic curve (the Gompertz curve), the importance of the influence of new technologies on the efficiency of enterprises' functioning was considered. The paper found that it is impossible to formulate a single criterion for the permissible risk for all types of equipment and technologies. The existing ways of minimizing certain types of risk have been analyzed. The analysis of technological risk is carried out. The ways of managing risks associated with new technologies are proposed.

Keywords: new technologies, innovation, technological risk, risk management.

Введение. Жизнедеятельность современного общества, его устойчивость и способность развиваться определяется многими факторами, главным среди которых является культура, информационные процессы, инновации, технологический уровень и состояние экологической культуры.

Опыт стран с развитой рыночной экономикой доказывает, что разработка и внедрение новых технологий являются важнейшими условиями функционирования предприятий в среде конкуренции и свободных рыночных отношений.

Технологические нововведения – одна из причин забот и волнений руководителей производства: плохо, когда новшества отсутствуют, тревожно и хлопотно, когда они есть.

По мнению многих исследователей, внедрение новых технологий – процесс уникальный, требующий творческого подхода, неповторимости, одаренности. Вместе с тем, в понятие технологических новшеств

входит нечто большее: это борьба на рынке между новаторами и обороняющимися, защищающими свои нынешние доходы; это рисковая категория, которая может привести фирму и к небывалым прибылям, и к банкротству.

Известный ученый Р. Фостер на основе проведенных им в течение 25 лет исследований сделал вывод о том, что риски, возникающие при разработке и внедрении новых технологий, поддаются прогнозированию с помощью многих методов, подчиняются определенной логике и предсказуемы. Существуют способы минимизации некоторых видов риска или полной их ликвидации.

Актуальность работы. Целесообразность изучения проблемы оценки технологического риска, связанного с новыми технологиями, и управления последним вытекает из признания большинством экономистов факта неустранимости риска именно технологического происхождения.

Многие руководители считают, что внедрение новых технологий сопряжено с большим риском, нежели риск потерять занимаемые фирмой позиции на рынке. Однако опыт компании «Проктер энд Гембл», «Джонсон энд Джонсон» (США) доказывает обратное. Они сосредотачивают усилия на том, чтобы внедрить необходимую технологию в нужное время, подвергая себя технологическому риску, и тем самым избегают риска потерять свою рыночную нишу.

Результаты исследований. Для фирмы, которая стремится к лидерству и не хочет терять постоянных клиентов, технологические новшества неизбежны и связаны с риском, но отказ от них еще более рискован.

Технологический риск – явление сложное, связанное с экономической конъюнктурой, социальной и экологической обстановкой, а также поведением партнеров, конкурентов и потребителей.

Технологический риск можно определить как вероятность потери предприятием некоторой части собственных ресурсов, снижение доходов или появление дополнительных расходов в результате разработки и внедрения технологических новшеств.

Однако для более детального рассмотрения рисков при внедрении новых технологий может успешно использоваться S-образная кривая (рис. 1) в математике – логистическая кривая, или кривая Гомпертца).

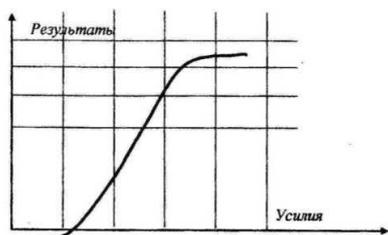


Рис. 1 – S-образная кривая

Из рис. 1 видно, что при вложении средств в разработку и внедрение технологии успехи ограничены. Далее результаты улучшаются скачкообразно. Чем круче логистическая кривая, тем результативнее процесс.

В начале кривой для получения положительного эффекта необходимы значительные усилия. Далее результаты возрастают при небольших затратах. Затем, по мере инвестирования в процессе дополнительных средств, он становится все более трудным и дорогостоящим. Ведь всегда существует какой-то предел, когда нужно остановиться либо изменить направление. Белый цвет нет смысла делать еще более белым, так как человеческий глаз способен воспринимать лишь определенную степень белизны.

S-образная кривая отражает зависимость между затратами на новую технологию и результатами, полученными от вложенных средств (рис. 1).

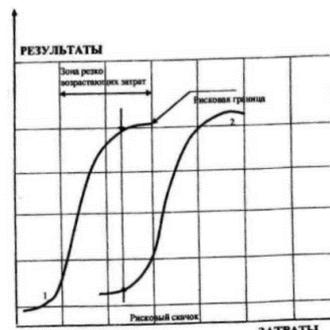


Рис. 2 – Пара S-образных кривых: 1 – существующая технология; 2 – новая технология

Все это объясняется рисковым пределом, который находится вверху S-образной кривой (рис. 2).

Рисковым предел является самым надежным ключом к выявлению момента устаревания существующей технологии и разработки новшества. Приближение к рисковому пределу можно определить по резко возрастающим издержкам производства.

S-образная кривая подсказывает, что по мере приближения к рисковому пределу, технология становится все более дорогостоящей. Близость к пределу означает, что все существенные возможности улучшения технологии уже использованы. На данный момент существует три пути решения этой проблемы:

- переключиться на сбыт;
- увеличить расходы на развитие и усовершенствование имеющейся технологии;
- расстаться с существующей технологией, которая еще приносит прибыль, однако явно устаревает, и переключиться на инновацию.

Первый путь имеет определенные преимущества, которые можно определить, как кратковременные. Ведь без внедрения новшеств невозможно преодолеть отставание фирмы в области научно-технического прогресса (НТП).

Сбытовая деятельность должна идти по пути, параллельному совершенствованию производства с помощью новых технологий.

Второй путь является вовсе регрессивным. Существует некоторая вероятность того, что по мере приближения к рисковому пределу процесс может протекать в обратном направлении (закон убывающей отдачи).

Кроме того, близость к пределу открывает возможности для конкурентов, внедряющих новые технологии с более высокими пределами, догнать лидера. Идя по вышеуказанному пути, фирма избегает инновационного технологического риска, но обрекает себя на риск потери вновь вложенных в технологию средств, риск оказаться вытесненной с собственной ниши рынка, риск потерять лицо инновационной фирмы.

И, наконец, третий путь, непосредственно связанный с технологическими новшествами. Риски в данном случае обладают эффектом лавины, одни риски влекут за собой другие, например, инфляционный риск, риск завышенной либо заниженной цены, риск непризнания новшества потребителем, риск полной или частичной потери вложенных средств, риск банкротства.

Весьма важным в данной ситуации следует считать процесс управления рисками. В основе этого процесса лежит осознание рискованных пределов, определение времени замены старых технологий на новые, наблюдение за действиями конкурентов, прогнозирование результатов инновационных проектов, использование различных способов уменьшения рисков или полной их ликвидации, обоснование тех рисков, избежать которые невозможно.

Исследования западных экономистов доказывают, что инновационный проект, разработанный с учетом рисков, как правило, приносит прибыль.

Кроме рискованного предела логистической кривой, существует рискованный скачок. Рискованный скачок – это переход от одной группы технологий к другой. Если известно, что оставшийся потенциал технологии незначительный (близок к рискованному пределу), то рискованный скачок лишь вопрос времени (рис. 2).

Как правило, одновременно существуют две и более конкурирующие технологии. Более целесообразно изображать пары либо группы S-образных кривых. Промежуток между ними – рискованный скачок, при котором одна технология замещает другую. Период рискованного скачка характеризуется хаосом. В этой связи важной задачей для фирмы является умение преодолевать рискованные скачки. Немецкие фирмы вкладывают немалые деньги в исследования, чтобы знать свое местоположение на соответствующей S-образной кривой и наблюдать за тем, насколько являются близкими рискованный предел и рискованный скачок.

Оценка и управление риском при внедрении новых технологий не могут игнорировать человеческий фактор. Среди ученых существует мнение, что одним из критериев НТП является полное отсутствие риска для человека. Однако такую постановку вопроса следует считать неоправданной. Любая деятельность человека носит вероятностный характер и поэтому связана с некоторым изначально существующим риском. Кроме того, полное исключение риска, связанного с новыми технологиями, привело бы к необходимости отказаться от автомобилей, самолетов и др.

Очевидно, что невозможно сформулировать единственный критерий допустимого риска для всех

видов техники и технологии. Однако, развитие теории рисков отчасти связано с социальной потребностью расширения и углубления знаний о риске.

Технологический риск в современных условиях приобретает статус социально-философской категории. «Внедрение новых технологий ведет к снижению затрат на материалы и рабочую силу» – это часто основной аргумент, приводимый в пользу новшеств. Сокращение числа занятых в производстве принято считать успехом, независимо от возникающих проблем.

В процессе внедрения новых технологий основное внимание уделяется инвесторам, запросам потребителей, держателям акций.

Трудовые ресурсы же рассматриваются как любой другой вид ресурсов, как средство удовлетворения потребностей.

В этой ситуации возникает проблема так называемого социального риска:

- безработицы,
- потери стабильного заработка,
- текучести кадров,
- нехватки профессионалов,
- забастовки и др.

Социальный риск тесно связан с деятельностью, осуществляемой субъектами в ситуации неизбежного выбора в условиях внедрения новшеств и связанной со снятием неопределенности.

Возникает вопрос: существуют ли способы избежать или хотя бы снизить социальный риск? Как в данной ситуации поступает руководство зарубежных фирм?

Некоторые западные фирмы предпочитают полагаться на естественную убыль и сокращение занятых на добровольной основе с использованием целевых программ, направленных на придание привлекательности раннему уходу на пенсию.

Большинство компаний считает перекалфикацию средством, позволяющим избежать обязательных сокращений. Это означает большую гибкость в организации производства, когда работники безболезненно могут переводиться с одной работы на другую. Кроме того, в структуре рабочей силы происходит снижение числа низко квалифицированных трудящихся.

При внедрении новых технологий некоторые американские фирмы «замораживают» наем. Единственная сфера (в которую могут приниматься специалисты со стороны) – работа с новой технологией. Кроме того, руководство ориентируется на долгосрочное планирование производства. Опыт зарубежных компаний показывает, что на полное внедрение технологии во многих случаях уходит три-четыре года, пока не будет достигнут новый уровень экономической эффективности и избыток рабочей силы станет очевиден. Если при этом имеет место устойчивый рост спроса, то число занятых может остаться прежним.

Гарантия занятости является отличительной особенностью японского управления. После строгого подбора кадров руководство направляет огромные

усилия на стабильность занятости и постоянное повышение подготовки трудящихся. Эта работа проводится с пониманием того, что служащие, обладающие технологическими знаниями, – это «ноу-хау» компании. Японское управление выделяет людей среди других ресурсов. президенты японских фирм считают, что, если состав рабочей силы меняется из-за высокой текучести кадров, ценные технологические разработки будут постоянно уплывать из компании. Японские корпорации гарантируют своим служащим работу и используют систему вознаграждения, основанную на трудовом стаже.

Кадровая политика США и, особенно Японии, несомненно, представляет огромный интерес. Однако, вряд ли пути снижения социального риска, о которых говорилось выше, могут применяться в условиях России. Продолжается спад производства, предприятия простаивают. Кадровые службы без сожаления расстаются с работниками, часто высокой квалификации.

Выводы. В сложившейся ситуации глобальной экономической проблемой следует считать восстановление производства на основе внедрения новых технологий. А воплощение технологической модели не может обойтись без трудовых ресурсов.

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Оценка и управление риском при внедрении новых технологий / В.П. Свидерский, А.Ф. Доровской// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. №43(1265). – С. 50–53 – Библиогр.: 3 назв.– ISSN 2519-2671

Оцінка і управління ризиком при впровадженні нових технологій / В.П. Свідерський, О.Ф. Доровської// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – №43(1265). – С. 50–53 – Бібліогр.: 3 назв.– ISSN 2519-2671

Assessment and management of risk in the introduction of new technologies / V.P. Svidersky, O.F. Dorovskoy // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Innovative technologies and equipment of materials processing in engineering and metallurgy. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2017. – No 43(1265). – P. 50–53. – Bibl.: 3. – ISSN 2519-2671

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Свидерский Владимир Павлович – доктор технических наук, профессор, Харьковский институт бизнеса и менеджмента тел.: (050) 841-30-09.

Свідерський Володимир Павлович – доктор технічних наук, професор, Харківський інститут бізнесу і менеджменту, тел.: (050) 592-92-33.

Svidersky Vladimir Pavlovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Kharkov Institute of Business and Management tel.: (050) 841-30-09

Доровской Алексей Федорович – кандидат экономических наук, доцент, зам. генерального директора Государственного предприятия «Завод имени В. О. Малышева», доцент кафедры экономических и социальных наук Харьковского национального экономического университета имени Семена Кузнеця, e-mail: oleksiydorovskoy@ukr.net

Доровської Олексій Федорович – кандидат економічних наук, доцент, заступник генерального директора Державне підприємство «Завод імені В. О. Малишева», доцент кафедри економічних і соціальних наук Харківського національного економічного університету імені Семена Кузнеця, e-mail: oleksiydorovskoy@ukr.net

Dorovskoy OLEKSIY – candidate of economic sciences, associate professor, deputy Director General of the State Enterprise "Plant named after VO Malyshev", Associate Professor of the Department of Economic and Social Sciences of the Kharkov National University named after Semyon KuznetsB e-mail: oleksiydorovskoy@ukr.net

УДК 621.793.6: 621.785.5

Б. П. СЕРЕДА, И. В. ПАЛЕХОВА

УПРОЧНЕНИЕ ВАЛКОВ ПРОКАТНОГО СТАНА ТИТАНОВЫМИ ПОКРЫТИЯМИ В УСЛОВИЯХ СВС

Розглянуті результати досліджень процесів нанесення багатокомпонентних титанових покриттів в режимі теплового самозапалення на вуглецевих сталях.

За допомогою методів математичного моделювання розроблені оптимальні склади СВС-сумішей для нанесення комплексних покриттів. Вивчений вплив складів реакційних сумішей на властивості отриманих покриттів. Приведена схема формування захисних покриттів. Встановлені кінетичні і теплофізичні закономірності зростання шарів.

Представлені результати мікроскопічного і рентгеноструктурного аналізів фазового складу отриманих покриттів, виконаний аналіз їх якісних характеристик/

Ключові слова: хімічні газотранспортні реакції, високотемпературний самопоширений синтез, титанові покриття, теплове самозапалення, дифузія, щільність, мікротвердість.

Рассмотрены результаты исследований процессов нанесения многокомпонентных титановых покрытий в режиме теплового самовоспламенения на углеродистых сталях.

С помощью методов математического моделирования разработаны оптимальные составы СВС-смесей для нанесения комплексных покрытий. Изучено влияние составов реакционных смесей на свойства полученных покрытий. Приведена схема формирования защитных покрытий. Установлены кинетические и теплофизические закономерности роста слоев.

Представлены результаты микроскопического и рентгеноструктурного анализов фазового состава полученных покрытий, выполнен анализ их качественных характеристик

Ключевые слова: химические газотранспортные реакции, самораспространяющийся высокотемпературный синтез, титановые покрытия, тепловое самовоспламенение, диффузия, плотность, микротвердость.

The results of researches of processes of causing of multicomponent titanic coverings are considered in the mode of thermal spontaneous combustion of self-propagating high temperature synthesis on carbon steels. A chart over of forming of coverings is brought with the use of chemical gas-transport reactions.

By means of methods of mathematical design optimal compositions of SHS-mixture are worked out for causing of complex coverages. The analysis of meaningful parameters influencing on a structure and operating properties of coverages is presented.

Kinetic and thermophysical conformities to law of height of protective layers are set. Results are presented microscopic and X-ray diffraction analyses of phase composition of the got coverings, the analysis of their quality descriptions is executed. On the basis of the got conformities to law of forming of layers and their operating descriptions powder-like compositions of reactionary SHS- mixture are worked out for work-hardening of steelworks. The offered compositions of mixtures were tested for the superficial work-hardening of rollers of flattening mills. The conducted tests on a microhardness and inoxidizability showed the improvement of descriptions of superficial layer.

Keywords: chemical gas-transport reactions, self-propagating high temperature synthesis, titanic coverings, thermal spontaneous combustion, diffusion, closeness, microhardness.

Введение. С целью 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, Al и Si позволяет не только повышать твердость поверхностного слоя, жаростойкость и коррозионную стойкость изделий, но и 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 [6–11]. СВС представляет собой высокоинтенсивное экзотермическое взаимодействие химических элементов в конденсированной фазе, способное к самопроизвольному распространению в виде волны горения. Процессы обработки могут осуществляться в режиме горения или теплового самовоспламенения

и характеризуются интенсивным нанесением покрытий благодаря наличию градиента температур в системе изделие – порошок среда.

Целью 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.

Химико-термическая обработка углеродистых сталей проводилась в реакторе открытого типа в рабочем интервале температур 950–1100°C 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 250–350 мкм.

Подготовка поверхности образцов включала последовательные стадии шлифовки, полировки и обезжиривания в ацетоне. Инициирование процесса насыщения осуществляли путем предварительного

нагрева в печі сопро­тив­ле­ння до тем­пе­ра­ту­ри на­ча­ла са­мо­вос­пла­ме­не­ня (ско­ро­сть на­гре­ва – 0,5°C/с). Тем­пе­ра­ту­ри СВС-смесі кон­тро­лю­ва­ли хро­мел­ь-алю­ме­ле­во­ю тер­мо­па­ро­ю в за­щи­т­но­му че­х­ле, вве­де­но­ю не­по­с­ре­д­ст­ве­но в об­'єм ших­ти, і під­клю­че­но­ю к по­тен­ці­ом­ет­ру се­рії КСП.

Тол­щи­ну упр­оч­не­них сло­ев ис­сле­до­ва­ли на се­ве­то­во­му мі­к­ро­ско­пе "Neophot-21" при уве­ли­че­н­ні ×150, × 250. Мі­к­ро­ст­рук­ту­ру ви­яв­ля­ли ме­то­дом тра­в­ле­ня в 3% спи­р­то­во­му ра­ств­о­ре пі­кри­но­во­ї ки­сло­ти (ТУ 6-09-08-317-80). Для ви­яв­ле­ня гра­ниць зе­рен фер­ри­та ис­поль­зо­ва­ли 4% спи­р­то­вий ра­ств­о­р азо­т­ної ки­сло­ти [12].

Іс­сле­до­ва­н­ня е­ле­мен­т­но­го со­ста­ва про­во­ди­ли ме­то­дом мі­к­ро­рен­т­ге­но­спек­тр­аль­но­го ана­ли­за з при­ме­н­ен­ням мі­к­ро­ана­лі­за­то­ра JEOL "Superprob-733". Ло­каль­но­сть ана­ли­за 1 мкм², г­ли­би­на ана­ли­за ~ 1 мкм. Мі­к­ро­т­вер­д­ість по­к­ри­т­тів оп­ре­де­ля­ли на при­бо­ре ПМТ-3. Кор­ро­зій­ну стій­кість об­раз­ців з по­к­ри­т­тя­ми оці­ню­ва­ли в 10-% ра­ств­о­ре H₂SO₄ при тем­пе­ра­ту­ре 20°C. Для ра­ху­н­ку ра­в­но­ва­ж­но­го со­ста­ва про­дук­тів се­сте­ми бу­ло ис­поль­зо­ва­но при­клад­ні па­ке­ти про­грам "АСТРА.4" і Recalc [13].

При ра­зо­роб­ці со­ста­вів по­ро­ш­ко­вих ре­ак­цій­них СВС-смесей, об­ес­пе­чу­ю­чих ви­со­ку­ю кор­ро­зій­ну стій­кість, ис­поль­зо­ва­ли ме­то­ди ма­те­ма­ти­че­ско­го пла­ну­ван­ня ек­сп­е­ри­мен­та з ре­алі­за­цією по­л­но­го фак­тор­но­го ана­ли­за по пла­ну 2³ і д­ро­б­но­го фак­тор­но­го ек­сп­е­ри­мен­та 2⁴⁻¹.

Ви­бір оп­ти­маль­но­го со­ста­ва се­мі­си для про­ве­де­ня СВС-про­цес­сів в ус­ло­ві­ях те­п­ло­во­го са­мо­вос­пла­ме­не­ня про­во­ди­ли на ос­но­ван­ні ре­зу­ль­та­тів ис­сле­до­ва­н­ня те­п­ло­вої кар­ти­ни СВС-про­цес­са і фі­зи­ко-ме­хані­че­ских сво­їх за­щи­т­них по­к­ри­т­тів (в ка­че­стві функ­цій от­кли­ка бу­ла ви­б­ра­на кор­ро­зій­на стій­кість по­к­ри­т­тів).

Па­ра­мет­ри оп­ти­мі­за­ції:

Y₁ – по­ка­зат­ель кор­ро­зій­но­ї стій­ко­сті,

t_{исп.} – 75 ч, для се­сте­ми Ti-Al-Si;

В ка­че­стві не­за­ви­с­им­их пе­ре­мін­них бу­ли ви­б­ра­ні: со­дер­жа­н­ня в СВС-се­мі­сі хро­мі­сто­ї со­ста­в­ля­ю­чої, ти­та­на, алю­мі­нія, крем­ні­я. В ка­че­стві ис­ход­но­го ма­те­ри­а­ла бу­ла ви­б­ра­на сталь 45. Ак­ти­ва­то­ром про­цес­са яв­ля­є­ть­ся J₂ для всіх се­сте­м.

Ра­ху­н­ку рів­ня­ми ін­тер­валів ва­р­ю­ван­ня, ха­рак­тер їх з­мі­не­н­ня і се­хе­ми ко­ди­ру­ван­ня пред­став­ле­ні в та­б­лиці 1. Вве­де­н­ня в се­мі­сь бо­ль­ше 5% га­зо­тран­спор­т­но­го а­ген­та при­во­ди­ть к силь­но­му ра­ст­ра­в­лю­ван­ню по­верх­но­сті об­раз­ця, ме­н­ше 1% не ак­ти­ві­зу­є пр­о­те­ка­н­ня всіх га­зо­тран­спор­т­них ре­ак­цій.

Для по­лу­че­н­ня сто­про­цент­но­го со­ста­ва по­ро­ш­ко­вих СВС-се­мі­сі­в в ка­че­стві ко­неч­но­го про­дук­та ис­поль­зо­ва­ли Al₂O₃.

Ре­зу­ль­та­том ек­сп­е­ри­мен­та до­л­жна ста­ти ма­те­ма­ти­че­ська за­ви­с­им­ість між­ду ис­сле­ду­є­ми­ми ха­рак­те­ри­сти­ка­ми в ви­де функ­ці­о­наль­ної зв'язі y=f(x₁, x₂, x₃, ..., x_m).

В ре­зу­ль­та­те ре­грес­сив­но­го ана­ли­за, бу­ли по­лу­че­ні ряд у­рав­не­н­ня, по­ка­зу­ю­чі за­ви­с­им­ість кор­ро­зій­но­ї стій­ко­сті за­щи­т­них по­к­ри­т­тів от

ре­жи­ма те­п­ло­во­го са­мо­вос­пла­ме­не­ня і со­дер­жа­н­ня ле­гу­ю­чих е­ле­мен­тів.

Чис­лен­ні зна­ч­ен­ня ко­е­фі­ці­є­нтів ре­грес­сії і їх зна­ч­им­ість, оп­ре­де­лен­ні з у­че­том різ­ни­ч­я дис­пер­сій для ко­ж­до­ї функ­ції от­кли­ка, а та­ко­же про­ве­р­ка зна­ч­им­ості по кри­те­рі­ю Ст­ю­де­нта і оці­нка а­дек­ват­но­сті мо­де­лі по кри­те­рі­ю Фі­ше­ра.

Для оці­нки а­дек­ват­но­сті у­рав­не­н­ня бу­ло про­ве­де­но ра­ху­н­ку по по­лу­че­н­ним у­рав­не­н­ням ре­грес­сії для оп­ти­маль­но­го ре­жи­ма те­п­ло­во­го са­мо­вос­пла­ме­не­ня. Ре­зу­ль­та­ти ра­ху­н­ку бу­ли со­по­ста­в­ле­ні з ек­сп­е­ри­мен­т­аль­ни­ми ис­сле­до­ва­н­ня­ми.

Е­ф­фек­тив­ність об­ра­бот­ки оп­ре­де­ля­є­ть­ся вре­мен­ни­ми па­ра­мет­ра­ми про­цес­са об­ра­бот­ки і те­п­ло­фі­зи­че­ских ха­рак­те­ри­сти­ка­ми ших­ти.

Ана­лі­з ре­ак­цій, про­ис­хо­дя­чих при те­п­ло­во­му са­мо­вос­пла­ме­не­н­ню СВС-ших­т, ре­зу­ль­та­тів ме­тал­ло­графі­че­ских ис­сле­до­ва­н­ня­в фа­зо­во­го со­ста­ва сло­ев по­зво­ли­ло оп­ре­де­ли­ти се­хе­му об­ра­зо­ван­ня по­к­ри­т­тів. Про­цес ус­ло­вно мож­но роз­ді­ли­ти на не­ско­ль­ко ста­дій [14]:

– ін­ерт­ний про­гре­в ре­ак­цій­но­ї се­мі­си до тем­пе­ра­ту­ри вос­пла­ме­не­ня со­про­во­джу­є­ть­ся іс­пар­ен­ням і ра­сп­а­дом га­зо­тран­спор­т­них но­си­те­лів до а­то­мар­но­го со­сто­ян­ня по ре­ак­ції

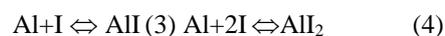


– те­п­ло­ве са­мо­вос­пла­ме­не­н­ня, на цій ста­дії пр­о­те­ка­єт е­к­зо­тер­мі­че­ська ре­ак­ція вос­та­но­в­ле­н­ня ок­си­да хро­ма



Тем­пе­ра­ту­ра в ре­ак­то­ре ре­з­ко по­ви­ща­є­ть­ся до ма­кс­им­аль­но­ї тем­пе­ра­ту­ри про­цес­са t_m. Про­ис­хо­ди­ть об­ра­зо­ван­ня га­зо­об­раз­них со­еди­н­ня­в і пе­ре­нос ос­но­в­них на­сы­ща­ю­чих е­ле­мен­тів к під­лож­ці по ре­ак­ції M+m/n Gn ⇌ MGm, де M – на­но­си­м­ий е­ле­мент, Gn – га­ло­ген, MGm – ле­ту­чий га­ло­ге­ні­д.

При е­то­му не­об­хо­ди­мо, чо­бы тран­спор­ту­є­м­ий е­ле­мент і під­лож­ка на­хо­ди­ли­ся в різ­них тем­пе­ра­тур­них зо­нах. На ста­дії те­п­ло­во­го са­мо­вос­пла­ме­не­н­ня про­ис­хо­ди­ть об­ра­зо­ван­ням га­зо­об­раз­них йо­ди­дів Ti, Al, Si і їх хі­мі­че­ский транспорт к по­верх­но­сті із­де­лій. Тер­мо­ди­на­мі­че­ский ана­лі­з ра­в­но­ва­ж­но­го со­ста­ва про­дук­тів се­сте­ми сви­де­тель­с­ту­є, чо­ в ис­сле­ду­є­мо­му діа­па­зо­ні тем­пе­ра­тур на­сы­ща­ю­чі е­ле­мен­ти ре­ак­цій­но­ї се­мі­си вза­мо­д­і­ю­ють з йо­дом як в а­то­мар­но­му, так і в мо­ле­ку­ляр­но­му со­сто­ян­ні, од­на­ко бо­ль­ше ве­ро­ят­ні ре­ак­ції вза­мо­д­і­ю­в­ан­ня е­ле­мен­тів з а­то­мар­ним йо­дом:





– 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.

Таблица 1 – Исследуемые факторы для системы титан-алюминий-кремний-хромистая составляющая

Характеристика	Факторы			
	В составе Al %, мас.	В составе Ti %, мас.	В составе Si %, мас.	В составе XС %, мас.
Код	X ₁	X ₂	X ₄	X ₃
Основной уровень	10	15	10	20
Интервал варьирования	5	5	5	5
Нижний уровень	5	10	5	15
Верхний уровень	15	20	15	25

Экспериментально установлено, что при повышении температуры насыщения и увеличении длительности изотермической выдержки происходит рост толщины диффузионного слоя (рис.1,2).

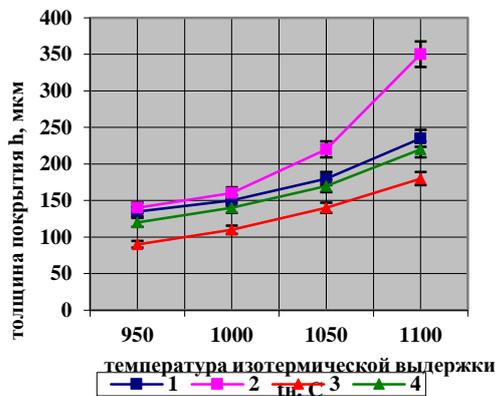


Рис. 1 – Влияние температуры изотермической выдержки на толщину титано-алюмо-силицированных слоев, полученных на технически чистом железе (2), стали 20 (1), стали 45 (4), У8 (3) в режиме теплового самовоспламенения. Продолжительность изотермической выдержки $\tau_b=60$ мин.

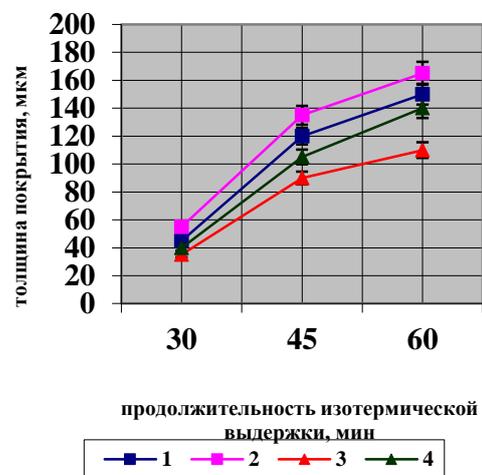


Рис. 2 – Влияние продолжительности изотермической выдержки на толщину титано-алюмо-силицированных слоев, полученных на технически чистом железе (2), стали 20 (1), стали 45 (4), У8 (3) в режиме теплового самовоспламенения при температуре насыщения $t_n=1000$ °C

Покрyтия, получаемые в СВС-процессах состоят из пленки наносимого продукта 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 (Ti, Fe)₅Si₃, ниже расположены зоны алюминидов Fe₂Al₅, FeAl, Fe₃Al,

легированных Ti и Si, под ней расположена зона α -твердого раствора титана, кремния, алюминия в железе с включением избыточной фазы Ti_5Si_3 (рис.3).

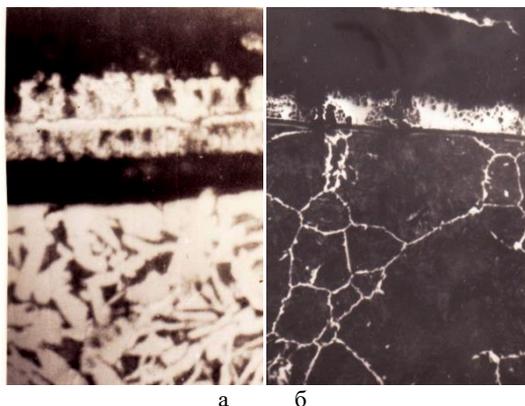


Рис. 3 – Микроструктуры многокомпонентных титано-алюмо-силицированных покрытий, полученных в режиме теплового самовоспламенения СВС – систем: а – на стали 45; б – на стали У8, $\times 250$

При диффузии некарбидообразующих элементов в γ -железе после достижения предела растворимости происходит $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращение. В α -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 $\sim 10\%$ мас. 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/см³. При увеличении концентрации кремния в смеси от 5 до 10% (масс.) общая пористость покрытия растет, при этом изменяется и конфигурация пор. Разработанные составы СВС-смесей были опробованы для упрочнения валков прокатных станов. При исследовании защитных слоев на приборе ПМТ-3 установлено, что микротвердость α -твердого раствора составляет 350-200 НВ, микротвердость сложного силицида на поверхности сталей составляет 1100-1000 НВ.

Проведенные испытания СВС-покрытий на коррозионную стойкость показали повышение этого показателя в 1,5-1,8 раз по сравнению с диффузионным аналогом.

Выводы. Разработаны составы СВС-шихт для получения многокомпонентных титановых покрытий на углеродистых сталях. Получены данные о влиянии теплотехнических характеристик СВС-шихт на структуру, прочность и пористость покрытий. Титаноалюмосилицированные материалы с СВС-покрытиями обладают улучшенными

эксплуатационными характеристиками по сравнению с диффузионными аналогами.

Список литературы

1. Химико-термическая обработка металлов и сплавов: Справочник / под ред. Ляховича Л. С. – М.: Металлургия, 1981. – 424 с.
2. Ворошнин 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. Є., 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. Мержанов 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 СВС / 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., Белоконь 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, Запорожье – С.67–71

Bibliografy (transliterated)

1. Himiko-termicheskaia obrabotka metallov i splavov: Spravochnik / pod red. Ljahovicha L. S. – Moscow: Metallurgija, 1981. – 424 p.
2. Voroshnin L. G. Antikorrozionnye diffuzionnye pokrytija – Minsk: Nauka i tehnika, 1981 – 296 p.
3. Lahtin Ju. M., Arzamasov B. N. Himiko-termicheskaia obrabotka metallov. Uchebnoe posobie dlja vuzov. – Moscow: Metallurgija, 1985. – 256 p.
4. Sereda B. P. Poverhneve zmichennja materialiv: Monografija / Sereda B. P., Kalinina N. E., Krugljak I. V. – Zaporizhzhja: RVV ZDIA, – 2004. – 230 p.
5. Sereda B. P. Metaloznavstvo ta termichna obrobka chornih ta kol'orovih metaliv. Pidruchnik. – Zaporizhzhja: Vid-vo ZDIA, 2008. – 302 p.
6. Filonenko B. A. Kompleksnye diffuzionnye pokrytija – Moscow: Mashinostroenie. 1981 – 137 p.
7. Merzhanov A. G. Processy gorenija i sintez materialov. – Chernogolovka: ISMAN, 1998. – 512 p.
8. Kogan Ja .D., Sereda B. P., Shtessel' Je. A. Vysokointensivnyj sposob poluchennja pokrytij v uslovijah SVS / Metallovedenie i termicheskaia obrabotka metallov, 1991, No 6. – P. 39–40
9. Bejgul O. O. Otrimannja znosostijkih pokryttiv na avtomobil'nih detalej pri nestacionarnih temperaturnih umovah / Bejgul O. O., Adamchuk S. I., Sereda D. B., Shul'ga A. S. // Zbimik naukovih prac' DDTU, Kam`jans'ke. – 2017. – Vipusk 1(30). – P. 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. Bekkert M., Klemm H. *Spravochnik po metallograficheskomu travleniju.* – Moscow: Metallurgija, 1979. – 336 p.
13. Sinjarev G. B., Vatolin N. A., Trusov B. G., Moiseev R. K. *Primenenie JeVM dlja termodinamicheskikh raschetov metallurgicheskikh processov* – Moscow: Nauka, 1982. – 263 p.
14. Sereda B. P., Palehova I. V., Belokon' Ju. A. , Sereda D. B. *Poluchenie intermetallidnyh soedinenij i pokrytij pri nestacionarnykh temperaturnyh uslovijah. Novye materialy i tehnologii v metallurgii i mashinostroenii: Nauchnyj zhurnal № 2, 2014. ZNTU, Zaporozh'e, P. 67–71*

Поступила (received) 20.10.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Упрочнение валков прокатного стана титановыми покрытиями в условиях СВС/ Б.П. Середя, И.В. Палехова // Вестник НТУ «ХПИ». Серия: Инновационные технологии и оборудование обработки материалов в машиностроении и металлургии. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2017. – № 43 (1265). – С. 54–58. – Библиогр.: 14 назв.– ISSN 2519-2671.

Зміцнення валків прокатного стану титановими покриттями в умовах СВС / Б.П. Середя, І.В. Палехова // Вестник НТУ «ХПИ». Серия: Инновационные технологии и оборудование обработки материалов в машиностроении и металлургии. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2017. – № 43 (1265). – С. 54–58. – Библиогр.: 14 назв.– ISSN 2519-2671.

Strengthening rolls of rolling mill with titanium coatings in SHS conditions / B. P. Sereda, I. V. Palehova // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Innovative technologies and equipment for processing materials in engineering and metallurgy. – Kharkov: NTU "KhPI", 2017. – No43 (1265). – P. 54–58. – Bibl: 14. – ISSN 2519-2671.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Середя Борис Петрович – доктор технічних наук, професор кафедри «Автомобілі та автомобільне господарство», Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське, 066 294 89 43, seredabp1@gmail.com

Середя Борис Петрович – доктор технических наук, профессор кафедры «Автомобили и автомобильное хозяйство», Днепропетровский государственный технический университет, г. Каменское, 066 294 89 43, seredabp1@gmail.com

Sereda Boris Petrovich – doctor of engineering sciences, professor of department "Cars and motor-car economy", Dnepr state technical university, 066 294 89 43, seredabp1@gmail.com

Палехова Ірина Володимирівна – Дніпровський державний технічний університет, інженер, м Кам'янське, 066 294 89 43, seredabp1@gmail.com

Палехова Ірина Владимировна – Днепропетровский государственный технический университет, инженер, г. Каменское, 066 294 89 43, seredabp1@gmail.com

Palekhova Irina Vladimirovna – Dneprovsky State Technical University, engineer, Kamenskoye,, 066 294 89 43, seredabp1@gmail.com

УДК 621.75.06-52

Е. Н. СМІРНОВ, В. А. СКЛЯР, В. А. БЕЛЕВИТИН**ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ДЕФОРМАЦИИ КВАДРАТНОГО ПОДКАТА
В ОВАЛЬНОМ КАЛИБРЕ ПРИ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПРОКАТКЕ**

Представлені результати дослідження особливостей формозміни бічної поверхні квадратного підката в овалному калібрі при прокатці в проміжній групі клітей безперервного сортового стану. Визначена форма бічної поверхні розкату і енергосилові умови прокатки стосовно діапазону величин параметра l_d/h_{cp} і температур прокатки, що використовуються на типовому сортовому стані. Показано, що стосовно до умов низькотемпературної прокатки процес необхідно вести при значеннях l_d/h_{cp} що не перевищують 0,981.

Ключові слова: Низькотемпературна прокатка, сортовий стан, формозміння, деформація, овальний калібр, енергосилові параметри, енергоефективність.

Представлены результаты исследования особенностей формоизменения боковой поверхности квадратного подката в овальном калибре при прокатке в промежуточной группе клетей непрерывного сортового стана. Определена форма боковой поверхности раската и энергосиловые условия прокатки применительно к диапазону величин параметра l_d/h_{cp} и температур прокатки, использующихся на типовом сортовом стане. Показано, что применительно к условиям низкотемпературной прокатки процесс необходимо вести при значении l_d/h_{cp} не превышающих 0,981.

Ключевые слова: Низкотемпературная прокатка, сортовой стан, формоизменение, деформация, овальный калибр, энергосиловые параметры, энергоэффективность.

The transition to modern energy-saving technologies (to which low-temperature rolling refers) leads to the need to address new issues related to changes in the behavior of surface defects of continuously cast billets during rolling. The formation of the lateral surface of rolled products in transitional calibers is of fundamental importance in terms of the quality of the final metal products. The calculated shape of the lateral surface made it possible to determine the most favorable rolling conditions that would ensure the formation of such a lateral surface, the shape of which would not lead to further defects, such as sunset. On the basis of the previously developed engineering approach to the calculation of metal deformation in the "square-oval" exhaust system for low-temperature rolling conditions, a mathematical model for determining the formation parameters was proposed. The results of a study of the features of the shaping of the lateral surface of a square feed in the oval caliber during rolling in an intermediate group of stands of a continuous section mill are presented. The shape of the lateral surface of the rolling and the energy-power rolling conditions are determined in relation to the range of the parameter values l_d/h_{cp} and the rolling temperatures used in a typical sort mill. It is shown that in the case of low-temperature rolling conditions, the process must be carried out at a value l_d/h_{cp} not exceeding 0.981.

Keywords: Low-temperature rolling, section mill, forming, deformation, oval caliber, power parameters, energy efficiency.

Введение. Переход на современные энергосберегающие технологии к которым относится низкотемпературная прокатка (снижение температуры нагрева по прокатку вплоть до 900 °С и ниже) приводит к необходимости решать новые вопросы, связанные с изменением поведения дефектов поверхности непрерывнолитых заготовок в процессе прокатки [1]. В этом случае не учет особенностей деформирования раската при пониженных температурах может привести к появлению новых или трансформации имеющихся поверхностных дефектов в дефекты проката.

Анализ основных публикаций. Опыт работы большинства действующих прокатных станов показывает, что дефекты на поверхности металлопроката являются одной из основных причин получения продукции несоответствующего качества. При этом в структуре брака наибольшую долю занимают дефекты, перешедшие на готовый прокат с исходных заготовок.

На современных среднесортных и мелкосортных прокатных станах применяют комбинированную систему черновых калибров: сначала идут прямоугольные калибры, а затем черновые калибры системы овал-ребровой овал или овал-круг. Наличие комбинированной системы обуславливает несколько точек перехода от одной системы к другой, которые несут в себе целую совокупность проблем, связанную с поведением дефектов поверхности, особенно в случае реализации низкотемпературных режимов прокатки [2].

Проблемной точкой следует считать момент перехода от подката квадратного сечения к подкату овольного сечения, т.е. возникает элемент вытяжной системы калибров «овал-квадрат». Касательно системы калибров «овал-квадрат» можно отметить, что ее существенным недостатком является значительная вероятность образования поверхностных дефектов при прокатке квадратной заготовки в овальном калибре из-за неравномерного обжатия по ширине калибра [3]. В этом случае интенсивное уменьшение высоты полосы в овальном калибре приводит к образованию «морщин», сжатие которых в последующем калибре может привести к их трансформации в трещины.

Особый случай представляет формоизменение дефектов в раземе калибров, где глубина дефектов может даже увеличиваться за счет увеличения толщины поверхностных слоев при втекании последних в разем, особенно в случае реализации низкотемпературных режимов прокатки [4, 5].

Целью работы являлось изучение особенностей формирования боковой поверхности квадратного раската, прокатываемого в овальном калибре для различных деформационно-температурных режимов прокатки.

Постановка задачи. Рассмотрим случай прокатки раската квадратного сечения, полученного из обжимной группы стана в первом калибре черновой (промежуточной) группы, который имеет форму овала (иногда плоского овала). Данная схема используется на многих непрерывных средне и мелкосортных прокатных станах. При прокатке такой квадратной

полосы в овальном калибре величина обжатия по ширине полосы различна, а пластическая деформация во время процесса прокатки распространяется, начиная с верхних слоев металла в его глубину, вслед за упругой деформацией, распространяющейся со скоростью звука в данной среде. Анализируя характер деформации необходимо учитывать:

- воздействие подпирющих усилий, возникающего в результате трения на поверхности взаимодействия «валок-металл» и зависящего от целой совокупности технологических факторов, среди которых температура играет главенствующую роль;
- форму фасонного калибра.

Калибры овального типа принадлежат к типичным калибрам, в значительной мере ограничивающие уширение, благодаря подпирющим усилиями, которые направлены к оси калибра. Поперечной деформации препятствуют совместно поверхностные подпирющие усилия. Эти силы, действующие на поверхностные слои металла, влияют на величину упругой и пластической деформаций, проникающей на определенную глубину внутрь полосы формируя тем самым профиль боковой поверхности квадратной полосы в овальном калибре.

Анализ формоизменения раската производили по методике описанной в работе [6], которая была реализована в программе Microsoft Office Excel и позволяла определить форму боковой поверхности раската. В качестве критерия оценки формирования боковой поверхности раската был выбран параметр $\Delta b_y/2$ (рис. 1) который представляет собой фактически величину ограниченного уширения.

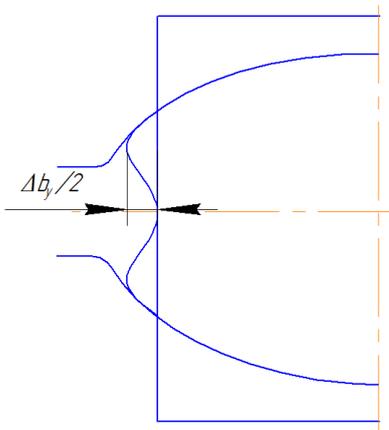


Рис. 1 – Схема обработки данных по формоизменению боковой поверхности

Методика исследования. В качестве базы для расчета был взят переход из квадратного подката в овальный в тех размерах, который используется на типовом непрерывном стане 390 (конструкция систем калибров фирмы MWE, Германия). Параметры овального калибра: ширина по буртам 163 мм, радиус овала 139 мм, раствор валков 30 мм. В ходе исследования изменяли величину отношения l_d/h_{cp} в пределах 0,53–1,29. Температура деформации принимала три фиксированных значения:

- 1200 °С – горячая прокатка (типовая);
- 1050 °С – прокатка с подсуживанием;
- 950 °С – низкотемпературная прокатка.

Результаты и их обсуждение. Как было указано выше, формирование боковой поверхности проката в переходных калибрах имеет принципиальное значение с точки зрения качества конечной металлопродукции. Таким образом, вычисленная форма боковой поверхности (рис. 2) позволила определить наиболее благоприятные условия прокатки, которые обеспечивали бы формирование такой боковой поверхности, форма которой бы не приводила к дальнейшему возникновению дефектов, например таких как закат.

В частности, для получения бездефектной поверхности, необходимо, чтобы форма боковой поверхности (свободной от контакта) имела выпуклый вид или, в крайнем случае, была плоской. Однако получение такой формы в рассматриваемой переходной паре крайне проблематично из-за большой неравномерности деформации, возникающей в овальном калибре.

Анализ полученных графических изображений (рис. 2) показал, что наибольшее влияние на получаемую форму боковой поверхности оказывает величина параметра l_d/h_{cp} , температура же имеет меньшее влияние.

При отношении $l_d/h_{cp} = 1,290$ возникали условия для возникновения дефекта в виде «заката» при всех значениях температуры. В этом случае, наличие двойной вогнутости, особенно в области перехода от свободной к контактирующей поверхности, при последующем изменении схемы деформации (именно по свободной поверхности) обязательно приводит к дефекту «закат». Кроме того, возможно и образование нарушений сплошности.

В случае понижения температуры прокатки до 950 °С, величина вогнутости начинает увеличиваться. Что также имеет негативный характер. Кроме того, наличие острых выгнутостей, будет способствовать их резкому охлаждению и, как следствие растрескиванию.

Уменьшение размеров исходного подката, задаваемого в овальный калибр, при неизменной ширине, способствует как уменьшению величины l_d/h_{cp} , так и приводит к существенному изменению формы боковой поверхности. Уже при уменьшении l_d/h_{cp} с величины 1,290 до 1,247, пропадает форма с двойной вогнутостью. Вогнутость остается одна, однако образуются два наплыва, а переходный участок от свободной поверхности овала к контактирующей, становится более плавным. Изменение температуры с 1200 °С до 950 °С не приводит к существенному изменению формы свободной боковой поверхности овального раската. В тоже время, четко прослеживается тенденция, уменьшения величины вогнутости. Однако, во всем исследованном диапазоне значений параметра l_d/h_{cp} достигнуть выпуклой поверхности не удалось, она лишь приблизилась к плоской.

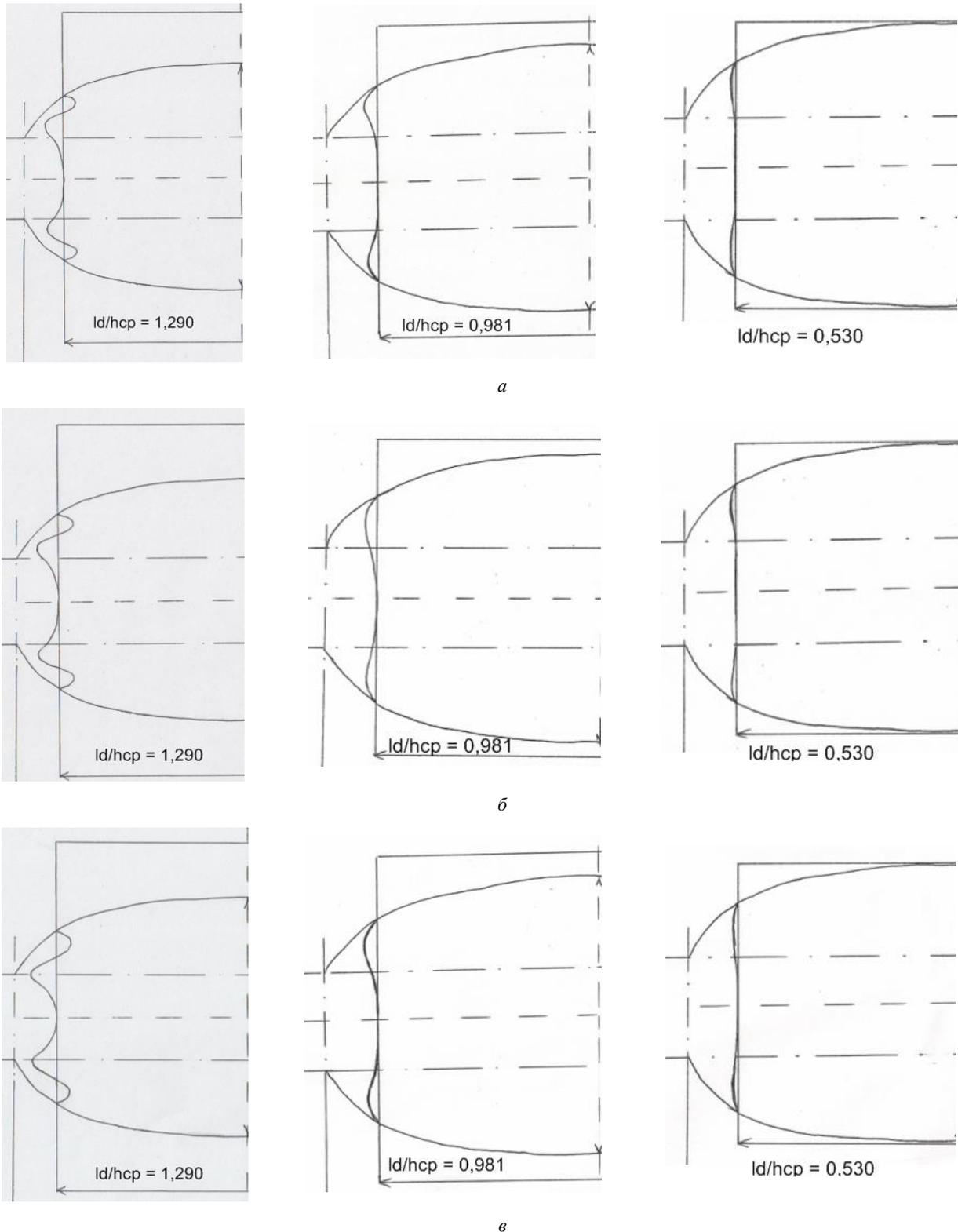


Рис. 2 – Изменение формы боковой поверхности раската в зависимости от параметра l_d/h_{cp} и температуры прокатки:
а – 1200 °С, б – 1050 °С, в – 950 °С

С физической точки зрения, такое явление можно объяснить наличием существенных сил трения на контактирующей поверхности. При этом, с понижением температуры, трение возрастает, что приводит к незначительному изменению формы.

Анализ полученных графических зависимостей (рис. 3) показывает, что при величине параметра

$l_d/h_{cp}=1,0$ величина $\Delta b_y/2$ на всех раскатах становится практически одинаковой, и колеблется на уровне 3 мм. Данный результат имеет принципиальное практическое значение. Оно объясняется тем, что в случае, если калибровка на стане спроектирована так, что при переходе от квадратного сечения к овалному обжатие квадрата характеризуется величиной $l_d/h_{cp}\approx 1$,

то данную калибровку можно использовать и для низкотемпературной прокатки.

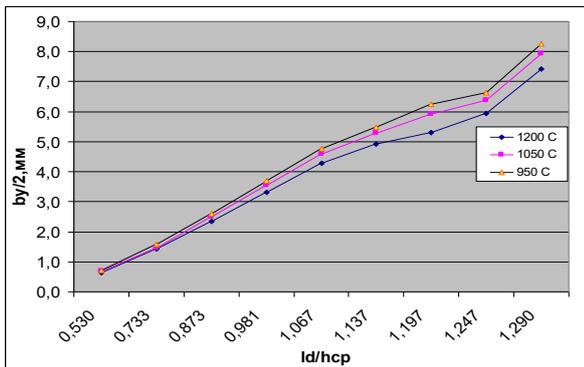


Рис. 3 – Зависимость величины выпуклости $\Delta b_y/2$ на свободной поверхности овальных раскатов в зависимости от параметра l_d/h_{cp} и температуры

Доказано, что подобная величина выпуклости, при дальнейшей прокатке хорошо формоизменяется без образования дефектов поверхности.

Для оценки эффекта от экономии энергоносителей было определены энергосиловые параметры прокатки для вышеперечисленных условий (рис. 4 и 5).

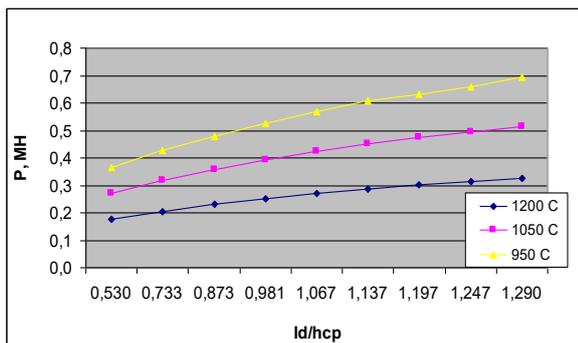


Рис. 4 – Зависимость силы прокатки от параметра l_d/h_{cp}

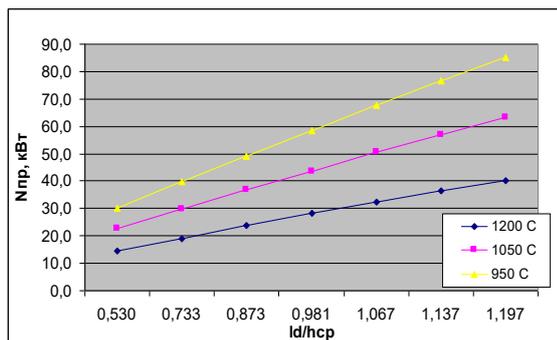


Рис. 5 – Зависимость мощности прокатки от параметра l_d/h_{cp}

Анализ полученных зависимостей показал что увеличение параметра l_d/h_{cp} с 0,53 до 1,29 приводит к увеличению силы прокатки на 40...80 %, а мощности прокатки на 170...200 %. Снижение же температуры прокатки с 1200 до 950 °C приводит к снижению силы прокатки на 22...41 % и мощности прокатки на 26...37 %. Таким образом применение низкотемпературной прокатки с учетом выбора

рационального отношения l_d/h_{cp} позволит получить заметную экономию энергоресурсов.

Выводы. На основе разработанного ранее инженерного подхода к расчету деформирования металла в вытяжной системе «квадрат – овал» для условий низкотемпературной прокатки предложена математическая модель определения параметров формирования, которая реализована в программе Microsoft Office Excel. Выполненный вычислительный эксперимент по определению формы боковой поверхности овального раската для условий изменения температуры в пределах 1200–950 °C и параметра l_d/h_{cp} 1,29–0,53 показал, что с целью минимизации дефектов на боковой поверхности овального раската осуществлять процесс низкотемпературной прокатки необходимо при значении l_d/h_{cp} не превышающих 0,981.

Список литературы

1. Смирнов, Е. Н. Конструктивный аспект возможности организации прокатки качественных марок стали с петлей охлаждения и выравнивания температуры в условиях типового сортового непрерывного стана / Е. Н. Смирнов, В. А. Скляр // Современные проблемы горно-металлургического комплекса. Наука и производство. Материалы Двенадцатой Всероссийской научно-практической конференции. Старый Оскол, 2015. – С. 224 – 230
2. Крахт, В. Б. Повышение эффективности сортамента мелкосортно-среднесортного стана 350 Оскольского электрометаллургического комбината / В. Б. Крахт, А. Е. Пратусевич, Н. А. Шляхов // Производство проката. – 2003. – №5. – С. 19 – 21.
3. Грудев, А. П. Технология прокатного производства / А. П. Грудев, Л. Ф. Машкин, М. И. Ханин. – М.: Металлургия, 1994. – 656 с.
4. Зильберг, Ю. В. Исследование закономерностей формоизменения поверхностных дефектов при прокатке / Ю. В. Зильберг [и др.] // Сталь. – 1997. – №10. – С. 44 – 46.
5. Смирнов, Е. Н. Неравномерность распределения скоростей течения металла при прокатке овальных заготовок с неравномерным распределением температуры по сечению / Е. Н. Смирнов // Наук. пр. Донец. держ. техн. ун-ту. Сер., Металургія. – Донецьк: ДонНТУ, 1999. – Вип. 8. – С. 121–126.
6. Скляр, В. А. Деформационное состояние в процессе прокатки квадратного подката в овальном калибре в клетях черновой группы непрерывного сортового стана / В. А. Скляр, Т. Д. Самойлова // Современные проблемы горно-металлургического комплекса. Наука и производство. Материалы тринадцатой Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Старый Оскол, 2016. – С. 124–131.

Bibliography (transliterated)

1. Smirnov E. N., Sklyar V. A. Konstruktivnyy aspekt vozmozhnosti organizatsii prokatki kachestvennykh marok stali s petley okhlazhdeniya i vyravnivaniya temperatury v usloviyakh tipovogo sortovogo nepreryvnogo stana [The constructive aspect of the organization of rolling high-quality steel grades with a cooling and the loop equalizing of the temperature in a typical continuous section mill] *Sovremennye problemy gorno-metallurgicheskogo kompleksa. Nauka i proizvodstvo. Materialy Dvenadtsatoy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. Staryy Oskol, 2015, pp. 224–230
2. Krakht V. B., Pratusевич A. E., Shlyakhov N. A. Povyshenie effektivnosti sortamenta melkosortno-srednesortnogo stana 350 Oskol'skogo elektrometallurgicheskogo kombinata [Improving the efficiency of product mix of a small-medium section mill 350 OEMK] *Proizvodstvo prokata*. 2003, No. 5, pp. 19–21.
3. Grudev A. P., Mashkin L. F., Khanin M. I. *Tekhnologiya prokatnogo proizvodstva* [Rolling technology] Moscow, Metallurgiya, 1994, 656 p.

4. Zil'berg Yu. V. Issledovanie zakonornostey formoizmeneniya poverkhnostnykh defektov pri prokatke [The study of regularities of forming surface defects during rolling] *Stal'*. 1997, No. 10, pp. 44–46.
5. Smirnov E. N. Neravnomernost' raspredeleniya skorostey techeniya metalla pri prokatke oval'nykh zagotovok s neravnomernym raspredeleniem temperatury po secheniyu [The uneven distribution of metal flow during rolling of oval billets with uneven temperature distribution over the cross section] *Nauk. pr. Donecz. derzh. texn. un-tu. Series: Metalurgiya*. Donecz'k, 1999, No. 8, pp. 121–126.
6. Sklyar V. A., Samoiova T. D. Deformatsionnoe sostoyanie v protsesse prokatki kvadratnogo podkata v oval'nom kalibre v kletyakh chernovoy grupy nepreryvnogo sortovogo stana [The deformation state in the process of rolling a square roll in the oval caliber in the stands of the roughing stand of a continuous mill] *Sovremennye problemy gorno-metallurgicheskogo kompleksa. Nauka i proizvodstvo. Materialy trinadtsatoy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem*. Saryy Oskol, 2016, pp. 124–131.

Поступила (received) 10.11.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Исследование особенностей деформации квадратного подката в овальном калибре при низкотемпературной прокатке / Е. Н. Смирнов, В. А. Скляр, В. А. Белевитин // Вестник НТУ «ХПИ». Серия: Инновационные технологии и оборудование обработки материалов в машиностроении и металлургии. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2017. – № 43 (1265). – С. 59–63. – Библиогр.: 6 назв.– ISSN 2519-2671.

Дослідження особливостей деформації квадратного підкату в овальному калібрі при низькотемпературній прокатці / Є. М. Смирнов, В. О. Скляр, В. А. Белевітін // Вестник НТУ «ХПИ». Серия: Инновационные технологии и оборудование обработки материалов в машиностроении и металлургии. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2017. – № 43 (1265). – С. 59–63. – Библиогр.: 6 назв.– ISSN 2519-2671.

The study of features of deformation of the square roll in the oval caliber at low-temperature rolling / Y. N. Smyrnov, V. A. Skliar, V. A. Belevitin // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Innovative technologies and equipment for processing materials in engineering and metallurgy. – Kharkov: NTU "KhPI", 2017. – No43 (1265). – P. 59–63. – Bibl: 6. – ISSN 2519-2671.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Смирнов Евгений Николаевич – доктор технических наук, профессор, Старооскольский технологический институт им. А. А. Угарова (филиал) федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», профессор, тел.: +7(980) 388-74-89; e-mail: en_smirnov@i.ua.

Смирнов Євген Миколайович – доктор технічних наук, професор, Старооскольський технологічний інститут ім. А. А. Угарова (філія) федерального державного автономного освітнього закладу вищої освіти «Національний дослідницький технологічний університет «МІСіС», професор, тел.: +7(980) 388-74-89; e-mail: en_smirnov@i.ua.

Smyrnov Yevgen – Dr. of Engineering Science, Professor, Sary Oskol Technological Institute. A. A. Ugarov (Branch) Of Federal State Autonomous Educational Institution Of Higher Professional Education "National Research Technological University "MISIS", Professor, tel.: +7(980) 388-74-89; e-mail: en_smirnov@i.ua.

Скляр Виталий Александрович – кандидат технических наук, доцент, Старооскольский технологический институт им. А. А. Угарова (филиал) федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», доцент, тел.: +7(980) 387-17-24; e-mail: vitaliiskliar@gmail.com

Скляр Віталій Олександрович – кандидат технічних наук, доцент, Старооскольський технологічний інститут ім. А. А. Угарова (філія) федерального державного автономного освітнього закладу вищої освіти «Національний дослідницький технологічний університет «МІСіС», доцент, тел.: +7(980) 387-17-24; e-mail: vitaliiskliar@gmail.com.

Skliar Vitalii – PhD, docent, Sary Oskol Technological Institute. A. A. Ugarov (Branch) Of Federal State Autonomous Educational Institution Of Higher Professional Education "National Research Technological University "MISIS", Associate professor, tel.: +7(980) 387-17-24; e-mail: vitaliiskliar@gmail.com

Белевитин Владимир Анатольевич – доктор технических наук, профессор, Южно-Уральский государственный гуманитарно-педагогический университет, профессор, тел.: +7(982) 307-83-98; e-mail: belewitina@rambler.ru

Белевитин Володимир Анатолійович – доктор технічних наук, професор, Південно-Уральський державний гуманітарно-педагогічний університет, професор, тел.: +7(982) 307-83-98; e-mail: belewitina@rambler.ru

Belevitin Vladimir – Dr. of Engineering Science, Professor, South Ural State Humanitarian Pedagogical University, Professor, tel.: +7(982) 307-83-98; e-mail: belewitina@rambler.ru

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

М. Е. ТАРАНЕНКО, И. М. ТАРАНЕНКО

СРАВНЕНИЕ ТЕХПРОЦЕССОВ ШТАМПОВКИ ТОНКОЛИСТОВЫХ ТРАНСВЕРСАЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Приведено аналіз результатів рішення низки науково-технічних задач комплексної проблеми інженерії полімерних композитних матеріалів у Національному аерокосмічному університеті ім. М.С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут». Наведено порівняння технологічних параметрів виготовлення технологічних просторових елементів для з'єднань деталей з композитів з металом. Традиційний процес штампування з металевих стрічок у штампах, обмежує виготовлення деталей зі стрічок високоміцних титанових сплавів. Пропонований процес лазерне підрізування зубців і їх відгин високошвидкісним струменем рідини, що отримується при електрогідрравлічному розряді, використовується для розподілу нержавіючих сталей та титанових сплавів. Основні переваги нового технологічного процесу полягають у відсутності необхідності виготовлення складного штампового оснащення і істотному поліпшенні якості поверхні елементів деталі, що відгинаються, що припускає зниження вірогідності руйнування волокон композиту. Гнуття зубців деталі високошвидкісним струменем рідини за пропонованою технологією, вимагає створення несерійної електрогідрравлічної установки. Вартість такої установки значно менше у порівнянні з традиційним обладнанням, а продуктивність вище. Встановлено, що для обробки нових матеріалів економічно доцільно використання нових технологічних процесів, що забезпечують високу якість.

Ключові слова: штампування зубців, тонколистова заготовка, лазерне гнуття, високошвидкісний струмінь рідини

Приводится анализ результатов решения ряда научно-технических задач комплексной проблемы инженерии полимерных композитных материалов в Национальном аэрокосмическом университете им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт». Приведено сравнение технологических параметров изготовления технологических пространственных элементов для соединений деталей из композитов с металлом. Традиционный процесс – штамповка из металлических лент в штампах, ограничивает изготовление деталей из лент высокопрочных титановых сплавов. Предлагаемый процесс – лазерная надрезка зубцов и их отгиб высокоскоростной струей жидкости, получаемой при электрогидравлическом разряде, применим для разделения нержавеющей сталей и титановых сплавов. Основные преимущества нового технологического процесса заключаются в отсутствии необходимости изготовления сложной штамповой оснастки и существенном улучшении качества поверхности отгибаемых элементов детали, что предполагает снижение вероятности разрушения волокон композита. Гибка зубцов детали высокоскоростной струей жидкости по предлагаемой технологии, требует создания несерийной электрогидравлической установки. Ее стоимость несоизмеримо меньше в сравнении с традиционным оборудованием, а производительность выше. Установлено, что для обработки новых материалов экономически целесообразно применение новых технологически процессов, которые обеспечат высокое качество.

Ключевые слова: штамповка зубцов, тонколистовая заготовка, лазерная гибка, высокоскоростная струя жидкости

Analysis of solution results for series of scientific technical problem of complex problem of composite materials engineering in Zhukovsky National aerospace university "Kharkiv Aviation Institute" is shown. Comparison of technological parameters at manufacturing technological spatial elements for joining composite articles with metal is conducted. Conventional process is forming of metal strips in forming dies but it restricts of articles producing of high-strength titanium alloys. Suggested novel process of laser cutting of teeth with their consequent bending by high-speed jet of liquid getting at electrohydraulic digit can be applied for separation of stainless steels and titanium alloys. Basic advantages of novel technological process consist in absence of necessity of complicated stamp rigging making and substantial improvement of quality of surface of article elements to be bent, that supposes decreasing of probability of composite fibers failure. Bending of article teeth of by high-speed jet of liquid on the offered technology requires creation of low-volume electro-hydraulic installation. The cost of installation is significantly less comparing with conventional equipment but performance is higher. It is found that to process novel materials with high economic efficiency one has to use novel manufacturing processes guaranteeing high quality of product.

Keywords: stamping of teeth, thin-walled blank, laser bending, high-speed jet of liquid.

Введение. При соединении волокнистых композитных деталей между собой или с металлическими элементами конструкций используют так называемые, трансверсальные элементы [1]. Их назначение – перераспределить касательные напряжения в зоне соединения на всю толщину композиционного материала.

Основная часть. Трансверсальные элементы представляют собой ленту толщиной 0,3...0,7 мм с надрезанными и отогнутыми на 90° клинообразными зубцами (рис. 1). Зубцы располагаются с шагом 5...10 мм (по двум направлениям). Их высота 5...7 мм. Длина элемента может достигать 150...250 мм, ширина 50 мм. В таких случаях зубья расположены в несколько рядов.

Основные технологические требования к их форме сводятся к следующему:

- торцевые профили зубцов не должны иметь заусенцев с острыми кромками;
- радиус скругления вершины не более толщины ленты;

– предпочтительно, чтобы фронтальная поверхность зубца не была плоской, а имела некоторую кривизну в продольном направлении.

Материал лент – титановые и алюминиевые (реже) сплавы, нержавеющие и углеродные стали.

Названные технические требования резко усложняют технологический процесс изготовления таких элементов традиционной штамповкой. Это обусловлено технологическими причинами.

Малая толщина лент вызывает необходимость применения беззазорных штампов для надрезов зубьев. А это, в свою очередь, обуславливает применение оптикошлифовальных станков для обработки режущих кромок штампов.

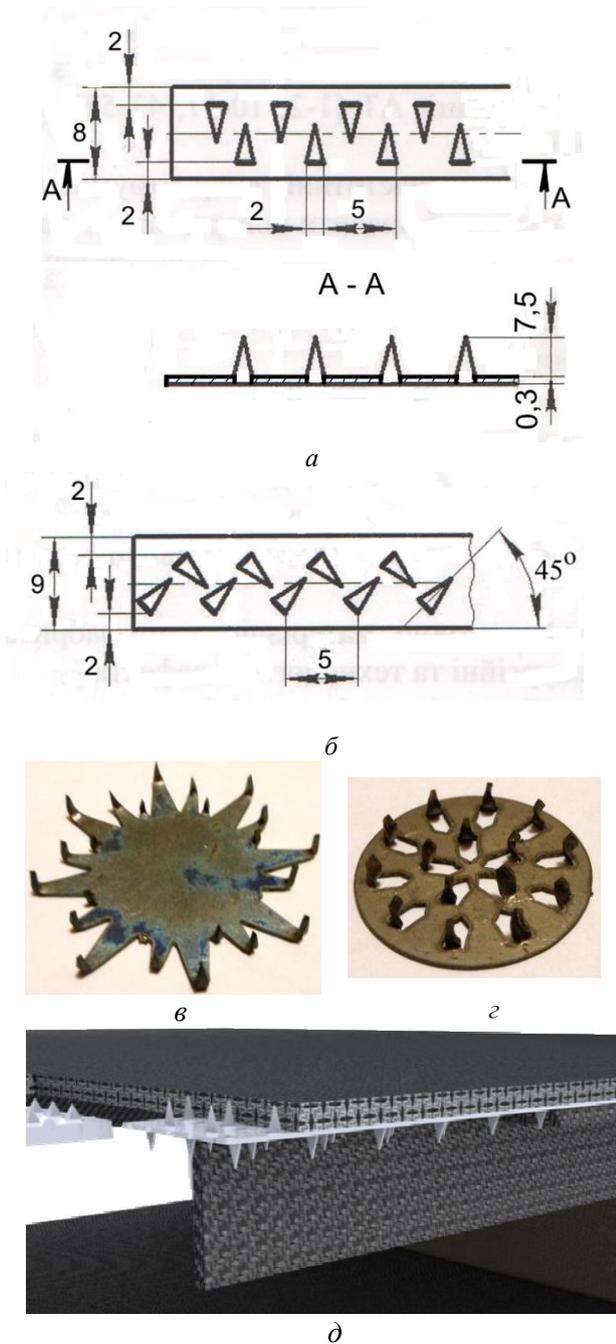


Рис. 1 – Эскизы трансверсальных элементов:
а, б – варианты расположения зубцов на ленте;
в, г – металлические прокладки в виде шайбы;
д – 3-D модель выполнения соединения композитных
деталей

Малые радиусы скругления вершины зубца не упрощают изготовления штампа. В качестве примера на рис. 2 приведен эскиз конструкции матричной полости для надрезания зубцов на лентах из штампованных сплавов. В этом случае матрица должна быть выполнена двухсекционной для четкого оформления вершины зубца. Режущие кромки секционных вставок должны быть изготовлены твердосплавными для уменьшения шероховатости надрезанных кромок. Кромка матрицы, вокруг которой производится отгиб, должна иметь радиус

скругления 3...5 толщины ленты. Секции матрицы должны быть съемными для перезаточки, так как их приемлемая стойкость кромок близка к 5 (пяти) надрезам. А это мало для названной номенклатуры деталей периметр охвата такой конструкции затрудняет последовательное изготовление зубцов.

Форма зубцов трансверсальных элементов может быть не только клиновидной формы, но и, например, гарпунообразной или в форме "ерша". Это значительно усложняет изготовление штампов и их стоимость.

Применение лазерной надрезки позволяет легко настраивать процесс под любую заданную форму зубца путем изменения программы перемещения позиционирующего устройства.

Для отгиба подреза сложной формы не требуются изменения формы поперечного сечения высокоскоростной струи жидкости.

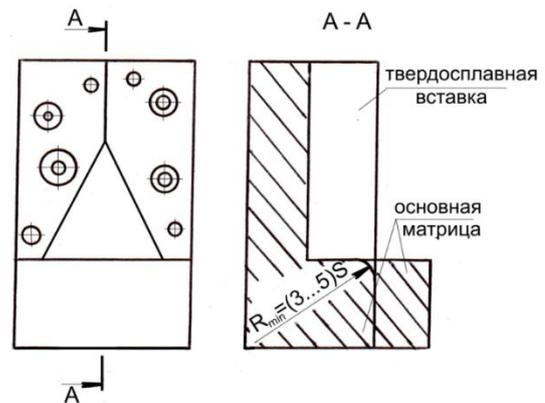


Рис. 2 – Секции твердосплавной матрицы охватываемые в закаленной обойме (на рис. не показана) по посадке H7/n6

Малый шаг расположения зубцов вызывает необходимость их поочередной штамповки, что также усложняет оснастку и удлиняет технологический процесс штамповки:

- применяемые материалы лент плохо обрабатываются в операциях надрезки (образуются сколы и заусеницы). А это требует их последующей зачистки;

- необходимость отгиба зубьев с минимальными радиусами ихгиба трудно выполнима для лент из титановых сплавов.

Рекомендуемые радиусыгиба для титана и его сплавов находятся в пределах 3...5 толщины заготовки [1].

Несоблюдение последней особенности приводит к образованию трещин у основания зубца, их разрушению и, в общем, к непрогнозируемому снижению несущей способности соединения [2].

Для алюминиевых сплавов эти радиусы скругления можно допустить соизмеримыми с толщиной лент, но существует вероятность коррозии на поверхностях контакта углеволокна с алюминиевыми сплавами.

Традиционный технологический процесс изготовления подобных деталей включает

следующие операции: надрезка углового контура в штампе (чаще по секциям). Гибка надрезанных участков и зачистные операции (гальванические или электрохимические).

Цель работы – разработать техпроцесс применимый для разделения нержавеющей сталей и титановых сплавов.

Предлагаемый технологический процесс заключается в надрезке углового контура лазерной резкой и гибка надрезанных участков на угол 90° импульсной струей жидкости с приданием отогнутому участку не плоского сечения.

Явными преимуществами технологического процесса являются:

- сокращение количества операций из-за возможности не применения зачистных операций. Лазерная надрезка обеспечивает оплавление края реза шириной до 0,06 мм;
- сокращение потребной оснастки (сложный надрезают штамп);
- нет необходимости применения листоштампованого оборудования.

Недостатки: потребность установки для лазерной резки и устройства для получения импульсных струй жидкости.

Рассмотрим подробнее и сравним преимущества и недостатки этих двух техпроцессов.

По современным данным [3, 4] стоимость лазерной резки конструкционных и композитных тонколистовых сталей находится в пределах 5,5...8,0 грн./м. Это соответствует стоимости и порезки одного клинообразного элемента высотой 7 мм около 0,04...0,06 грн./м. Стоимость лазерной установки небольшой мощности, потребной для резки тонколистового материала составляет несколько тысяч долларов США, но с учетом ее универсальности и производительности для массового изготовления подобных элементов составляет малую сумму для изготовления одного трансверсального элемента.

Для отгиба надрезанного участка ленты предлагается использовать электрогидравлическое устройство, метаящее струю воды (рис. 3). Подобные устройства используются для листовой штамповки, обрезки по контуру, имеющему сложную форму и др. Но при таких разделительных операциях трудно избегать образования мелких заусенцев. Малые размеры зубцов и шага их расположения затрудняют использование надрезки и гибо эластичной среды.

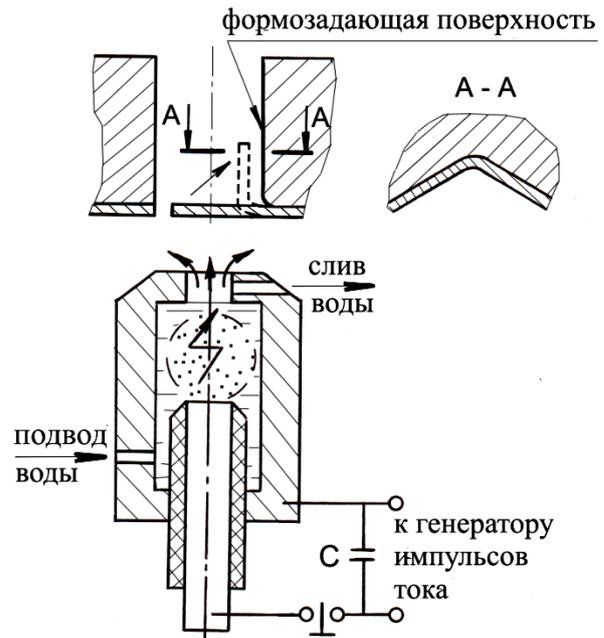


Рис. 3 – Схема электрогидравлического устройства, для гибки надрезанных участков на угол 90° импульсной струей жидкости с приданием отогнутому участку неплоского сечения

Устройство состоит из разрядной камеры, в которой находится электрод с высоковольтной изоляцией. Полость камеры заполнена водой. Которая постоянно обновляется. При подаче высокого напряжения с конденсатора С на электрод и корпус камеры в ее полости происходит электрогидравлический разряд. Он приводит к образованию парогазового пузыря (показан пунктиром), который выталкивает находящуюся над ним жидкость в сопло камеры с высокой скоростью. Эта жидкость, подлетает к заготовке. Давит на надрезанный участок и заставляет его отгибаться с высокой скоростью. Отгибаемый участок сталкивается с формозадающей поверхностью, деформируясь по ней.

Работа деформации при отгибе элемента из титанового сплава 300...5000 Дж. А, следовательно, запасаемая энергия электрогидравлического устройства можно оценить по зависимости

$$W_{зан} = \bar{\eta}' A_{деф},$$

где $W_{зан}$ – потребная запасаемая энергия; η' – к. п. д. процесса гибки струей, который находится в диапазоне 0,1...0,5; $A_{деф}$ – работа деформации при изгибе.

В результате такой оценки получаем $W_{зан} = 2...5$ кДж.

При рабочем напряжении современных электрогидравлических установок до 45 кВ и широко используемых импульсных конденсаторов типа ИКМ это соответствует батарее генераторов импульсных токов состоящей из 1-2 банок конденсаторов.

Выводы. Такая электрогидравлическая установка проста, не требует массивных прижимных устройств и дешево.

При необходимости поперечного изгиба зубцов соответственно профилируется гибочная оправка и поперечный изгиб происходит под давлением сил инерции перемещающегося зубца.

Устройство позиционирования может быть выполнено на компьютеризированном координатном столе, аналогичном используемому на станках для лазерной резки.

Приведенные соображения позволяют сделать вывод о преимуществах технологического процесса изготовления тонколистовых трансверсальных элементов сочетающих лазерную надрезку зубцов и электрогидравлическую отбортовку.

Список литературы

1. Карпов, Я. С. Проектирование деталей и агрегатов из композитов : учебник / Я. С. Карпов. – Х : Нац. аэрокосмич. ун-т «ХАИ», 2010. – 768 с.
2. Справочник конструктора штампов: листовая штамповка / под ред. Л. И. Рудмана. – М. : Машиностроение, 1988. – 496 с.

3. Коцюба, А. А. Новые конструктивно-технологические решения соединений композитных изделий в практике ГП «Антонов» / А. А. Коцюба, А. З. Двейрин, Я. О. Головченко // Технологические системы. Научно-технический журнал. – Киев, 2016, № 1 (74). – С. 19–25.
4. Режим доступа: www.lona.kh.ua/serv.ce/plazmenna/anezka. Дата обращения: 06.12.2016 г.

Bibliografy (transliterated)

1. Karpov, Ya. Proektirovanie detalej i agregatov iz kompozitov: uchebnik [Designing of articles and units of composites: textbook] – Kharkiv : Nac. ajerokosm. un-t “HAI”, 2010. 768 p.
2. Spravochnyk konstruktora shtampov: lystovaya shtampovka [Reference book of jig designer: sheet forming] pod red. L. Y. Rudmana. – Moscow : Mashynostroenye Publ., 1988. 496 p.
3. Kotsyuba, A. A., Dveyrin, A.Z., Golovchenko, Ya.O. Novye konstruktivno-tekhnolohycheskye reshenyya soedynenyu kompozytnykh yzdelyy v praktyke HP «Antonov» [Novel structural-manufacturing solutions of composite article joints in practice of “Antonov” company] // Tekhnolohycheskye systemy. Nauchno-tekhnicheskyy zhurnal. – Kyev. Publ., 2016, No. 1(74). – pp. 19–25.
4. Rezhym dostupa: www.lona.kh.ua/serv.ce/plazmenna/anezka. Data obrashchenyya: 06.12.2016.

Поступила (received) 14.11.2017

Бібліографічні описи / Библиографическое описание / Bibliography dicriptions

Сравнение техпроцессов штамповки тонколистовых трансверсальных элементов / М. Е. Тараненко, И. М. Тараненко // Вестник НТУ «ХПИ». Серия: Инновационные технологии и оборудование обработки материалов в машиностроении и металлургии. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2017. – № 43 (1265). – С. 64–67. – Библиогр.: 4 назви – ISSN 2519-2671.

Порівняння техпроцесів штамповки тонколистових трансверсальних елементів / М. Є. Тараненко, І. М. Тараненко // Вестник НТУ «ХПИ». Серия: Инновационные технологии и оборудование обработки материалов в машиностроении и металлургии. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2017. – № 43 (1265). – С. 64–67. – Библиогр.: 4 назви – ISSN 2519-2671.

Comparison of manufacturing processes of stamping for thin-walled transversal elements / М. Е. Taranenko, I. M. Taranenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Innovative technologies and equipment for processing materials in engineering and metallurgy. – Kharkov: NTU "KhPI", 2017. – No43 (1265). – P. 64–67. – Bibl: 4. – ISSN 2519-2671.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Author

Тараненко Михаил Евгеньевич – доктор технических наук, профессор, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», г. Харьков, тел.: (057) 788-41-70, e-mail: m.taranenko@khai.edu.

Тараненко Михайло Євгенович – доктор технічних наук, професор, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», м. Харків, тел.: (057) 788-41-70, e-mail: m.taranenko@khai.edu.

Mykhaiko Taranenko – Full Professor, National Aerospace University “Kharkiv aviation institute” named after N. Ye. Zhukovsky, Kharkiv, tel.: (057) 788-41-70, e-mail: m.taranenko@khai.edu.

Тараненко Игорь Михайлович – кандидат технических наук, доцент, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», г. Харьков, тел.: (057) 788-48-84, e-mail: igor.taranenko@khai.edu.

Тараненко Ігор Михайлович – кандидат технічних наук, доцент, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», м. Харків, тел.: (057) 788-48-84, e-mail: igor.taranenko@khai.edu.

Igor Taranenko – candidate of engineering sciences, associate professor, National Aerospace University “Kharkiv aviation institute” named after N. Ye. Zhukovsky, Kharkiv, tel.: (057) 788-48-84, e-mail: igor.taranenko@khai.edu.

УДК 621.793

В.Б. УСТЬЯНОВ, В.В. ІВАЩЕНКО

СТАТИЧНЕ ТА ВІБРАЦІЙНЕ ФОРМУВАННЯ ЯЧЕЇСТОЗАПОВНЕНИХ ВОГНЕТРИВІВ

Известны способы повышения термостойкости плотных огнеупоров, состоящие в ослаблении связи наполнителя (шамота) с матрицей. Для этого шамот покрывали слоем вещества (парафин), которое выпаривается и выгорает при обжиге, или имеет меньший модуль упругости (некоторые соли и окиси). В обоих случаях это обеспечивает уменьшение объемных напряжений в циклах «нагрев-охлаждение» и предотвращает возникновение и развития магистральных трещин. В работе разработан и исследован класс композиционных материалов с оригинальной структурой, составляющей пенообразный (ячеистый) каркас, полости которого заполнены другим веществом. Такие материалы получают статической или вибрационной формовкой из гранул двуслойных или многослойных (капсулированных). Предложенная макронеоднородная структура, открывает новые возможности в материаловедении. Установлено, что в зоне ниже 1000°C вспученный перлит в ячейках каркаса выполнял свои теплоизоляционные функции. Оптимальным по прочности и плотности является состав с объемом каркаса (10±20)% и диаметром гранул 5÷10 мм. Ячеистозаполненная структура обеспечивает эксплуатацию огнеупоров до 1300°C. Огневое сокращение легкоплавких ядер вспученного перлита и дальнейшее их полное расплавление не приводил к разрушению огнеупора, поскольку ячеистый огнеупорный каркас «держит форму».

Ключевые слова: огнеупоры, ячеистозаполненная структура, прессование, виброимпульсное формование.

Відомі способи підвищення термостійкості щільних вогнетривів, що полягають в послабленні зв'язку наповнювача (шамоту) з матрицею. Для цього шамот вкривають шаром речовини (парафін), яка випаровується і вигоряє під час випалювання, або має менший модуль пружності (деякі солі та окиси). В обох випадках це забезпечувало зменшення об'ємних напружень в циклах «нагрівання–охолодження» і запобігало виникненню і розвитку магистральних тріщин. В роботі розроблений та досліджений клас композиційних матеріалів з оригінальною структурою, що становить піноподібний (ячеїстий) каркас, порожнини якого заповнені іншою речовиною. Такі матеріали отримують статичним або вібраційним формуванням із сировинних гранул двохшарових чи багатшарових (капсульованих). Запропонована макронеоднорідна структура відкриває нові можливості в матеріалознавстві. Встановлено, що в зоні нижчих за 1000°C спучений перліт в ячейках каркасу виконує свої теплоізоляційні функції. Оптимальним, щодо міцності і щільності, є склад з об'ємом каркасу (10±20)% і діаметром гранул 5÷10 мм. Ячеїстозаповнена структура забезпечує експлуатацію вогнетривів до 1300°C. Вогневе скорочення легкоплавких ядер спученого перліту і подальше їх повне розплавлення не призводить до руйнування вогнетриву, оскільки ячеїстий вогнетривкий каркас «тримає форму».

Ключові слова: вогнетриви, ячеїстозаповнена структура, пресування, віброімпульсне формування.

There are known methods for increasing the heat resistance of dense refractories, which consist in weakening the bond between the filler (chamotte) and the matrix. To do this, the chamotte was covered with a layer of matter (paraffin), which evaporates and burns during roasting, or has a smaller modulus of elasticity (some salts and oxides). In both cases, this reduces the volumetric stresses in the heating-cooling cycles and prevents the occurrence and development of main cracks. A class of composite materials with an original structure constituting a foam-like (cellular) skeleton with cavities filled with another substance has been developed and studied. Such materials are obtained by static or vibrational molding from bilayer or multilayer granules (encapsulated). The proposed macro-inhomogeneous structure opens up new possibilities in materials science. It was found that in the zone below 1000° C the expanded perlite in the cells of the framework fulfilled its thermal insulation functions. The optimum strength and density is the composition with the carcass volume (10±20)% and the granule diameter 5÷10 mm. The honeycomb-filled structure provides operation of refractories up to 1300°C. The fire reduction of the fusible cores of expanded perlite and their further complete melting did not lead to the destruction of the refractory, since the cellular refractory skeleton «keeps the shape».

Keywords: refractories, cellular structure, pressing, vibroimpulse molding.

Вступ. Відомі способи підвищення термостійкості щільних вогнетривів, що полягають в послабленні зв'язку наповнювача (шамоту) з матрицею (спечена глина). Для цього шамот вкривали шаром речовини, яка випаровується і вигоряє під час випалювання (парафін), або має менший модуль пружності (деякі солі та окиси). В обох випадках це забезпечувало зменшення об'ємних напружень в циклах «нагрівання–охолодження» і запобігало виникненню і розвитку магистральних тріщин.

Актуальність. В роботі розроблений, досліджений і запатентований клас композиційних матеріалів з оригінальною структурою, що становить піноподібний (ячеїстий) каркас, порожнини якого заповнені іншою речовиною. Такі матеріали отримували статичним або вібраційним формуванням із сировинних гранул двох- чи багатшарових (капсульованих). Запропонована макронеоднорідна структура, що відкриває нові можливості в матеріалознавстві [1].

Методика досліджень. Для виготовлення щільного вогнетриву ми формували з глини на шнековому вакуумпресі з перфорованою решіткою джгути діаметром 2÷5 мм, під'ялювали і досушували

їх, обкочуючи у розчиномішалці вільного падіння. Наприкінці висушування на поверхню удовжених гранул («вермишелек»), що утворились при руйнуванні джгутів, накатували шар роз'єднуючого матеріалу (деревне або вугільне борошно, глинозем, молотий пісок тощо), а потім шар молотої глини. З отриманих гранул пресували лабораторні зразки – циліндри діаметром і довжиною 50 мм і повнотілу цеглу при тиску 20÷30 МПа. Дослідження проводили на циліндрах. При цьому змінювали діаметри «вермишелек», товщини роздільного шару і матеріалу оболонки (капсули). Для порівняння властивостей одночасно досліджували такі ж циліндри з традиційної глиношамотної суміші і зразки пластичного формування (кількість шамоту зменшили, а глини збільшили). Випалювали при температурі 1400°C. Під час пресування гранули пластично деформувалися і їхні оболонки об'єднувалися, утворюючи просторовий ячеїстий каркас (матрицю). Ядра гранул слугували наповнювачем і склали основний об'єм (80÷95%) матеріалу. По аналогії з ячеїстими (ніздроватими) бетонами і ячеїстою керамікою такі матеріали отримали назву «ячеїстозаповненими».

Термовитривалість визначали запропонованим нами методом – нагрівачи верх циліндрів протягом 2÷3 хвилин ацетиленовою горілкою до оплавлення і зіштовхуючи їх у воду. Кількість циклів нагрівання-охолодження до появи руйнуючих тріщин слугувала показником термовитривалості.

Для дослідження шлакостійкості ми запропонували доступний, у наших умовах, метод – у невипалених циліндрах висвердлювали (на половину висоти) вісьове заглиблення діаметром 10 мм, в яке після випалювання зразків вкладали сталеву підшипникову кульку і засипали доверху молотим доменим шлаком. Зразок декілька разів нагрівали в індукційній печі протягом 2÷3 хвилин для розплавлення шлаку і після кожного нагрівання охолоджували на повітрі. Такий жорсткий режим дозволяв оцінювати також і термовитривалість. Паралельно зі шлаком досліджували зразки з віконним склом, до якого додали 30% каустичної соди (для збільшення агресивності розплаву).

Мета досліджень. Створення щільних та полегшених шамотних вогнетривів.

Результати досліджень. На рис. 1 наведено фото структури шамотної цегли з гранул діаметром 5 мм. У якості роздільного шару деревне борошно. Помітний зазор між ядрами і ячеїстим каркасом.



Рис. 1 – Структура щільного шамотного ячеїсто заповненого вогнетрива

Дослідження показали, що за міцністю при стисканні на першому місці – зразки пластичного формування, на другому – традиційні шамотні, а ячеїстозаповнені – на останньому. При цьому звернули увагу на некрихкий (змінання) характер початку руйнування ячеїстозаповненої кераміки. За термовитривалістю – все навпаки. За стійкістю до руйнування шлаком зразки ячеїстозаповнені і пластичного формування були на рівних і перевищували традиційні шамотні, а розплав скла виявився менш агресивним. Хоч міцність на стискання вогнетривів не є важливим показником якості, на це питання ми теж звернули увагу.

Тому продовжили дослідження, намагаючись об'єднати переваги різних вогнетривів. Для цього готували суміші традиційної шамотної шихти з додаванням різної кількості «вермішелек» різних розмірів. Дослідження виявило, що найкращі результати за всіма показниками були у зразків з 20% гранул діаметром 3 мм.

Під час висушування гранул обкачуванням на краях «вермішелек» формувалися гантелеподібні потовщення. Такі гранули защемлювалися в глиношамотній матриці і підвищували міцність виробів при згинанні, тобто армували черепок.

Локальна повітряна і вогнева усадка гранул, а також наявність послабленого проміжного шару сприяли утворенню мікроцілин, які релаксували об'ємні напруження під час термічних циклів і гальмували розвиток магістральних тріщин [2, 3].

При цьому технологія виробництва вогнетривів суттєво не змінювалась, оскільки формувальні властивості глиношамотної суміші з добавкою армуючих капсульованих гранул були задовільними. Вважаємо, що покращення якості вогнетривів через додавання капсульованих гранул може бути першим етапом запровадження ячеїстозаповнених матеріалів у виробництво. Можливо, подальше зменшення діаметрів гранул і пошук оптимальних розмірів щілини між ядрами і каркасом дозволять виготовляти вогнетриви без попереднього випалювання глини «на шамот», тобто з чистої глини. Вакуумне формування джгутів та їх максимальна повітряна усадка забезпечена повільною сушкою при обкачуванні і співударяннях, надає великої міцності і щільності напівфабрикату. А вогнева усадка ядер призводить до формування зазорів між ядрами і каркасом і компенсує вогневу усадку виробів. Тобто, вогнева усадка цегли буде мінімізована, що дуже важливо для одержання точних розмірів вогнетривів.

Другим напрямком дослідження було отримання полегшених вогнетривів з ячеїстозаповненою структурою. Промисловість виготовляє теплоізоляційні матеріали для температур до 900°C на основі спученого перліту. Це штучна порошкоподібна речовина, яку отримують спучуванням при температурі 1100÷1200°C подрібненого природного вулканічного скла (перліту, обсідіану, попелу). Насипна вага його у межах 80-120 кг/м³. Вироби виготовляють пресуванням у формах перліту на зв'язці (глиняний шлікер, розчин рідкого скла, фосфогель). Температура їх використання обмежена розплавленням перліту, що веде до великої усадки та повного руйнування ізоляції.

Для підвищення температури експлуатації виробів ми формували обкачуванням гранули зі спученого перліту. Зв'язкою слугували водні розчини крохмалю і сульфітно-спиртової барди (ССБ). Діаметр гранул в межах 3÷30 мм. Під кінець обкачування на поверхню гранул наносили шар глиношамоту в кількості (5÷20) % від об'єму гранул. Глиношамотну суміш готували сумісним вібропомолом наповнювача (шамот, глинозем) з глиною. З цих капсульованих гранул статичним пресуванням (тиск 1÷2 МПа) чи віброформуванням з підвантаженням формували плити розміром від 100x100x10 мм до 300x300x100 мм і цеглу. Випалювали при 1000°C. Щільність отриманих виробів (400÷600) кг/м³. Міцність при стисканні 1÷2 МПа. Ячеїстозаповнена структура забезпечувала експлуатацію вогнетривів до 1300°C. Вогневе

скорочення легкоплавких ядер спученого перліту і подальше їх повне розплавлення не призводило до руйнування вогнетриву, оскільки ячеїстий вогнетривкий каркас «тримав форму».

На рис. 2 наведені структури цегли з гранул різних діаметрів. Цеглу випалювали при різних температурах і випробовували на різних режимах. Можна бачити поступове спікання ядер перліту, навіть до його повного плавлення.

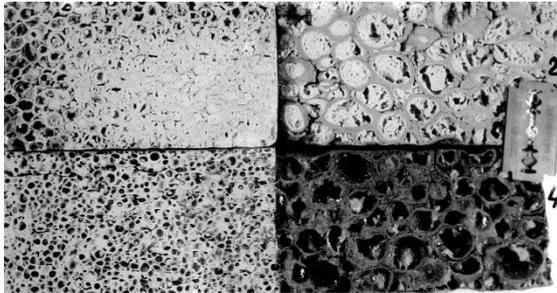


Рис. 2 – Структура ячеїстозаповнених легковагових вогнетривів

На рис. 3 цегла, що більше місяця щодня односторонньо (суміжні сторони цеглин) нагрівалася до 1100°C і охолоджувалася до кімнатної температури. Вона не дала усадки і не розтріскалася через градієнт температур (1100-80°C на протилежних ложках цеглини) і термоцикли.

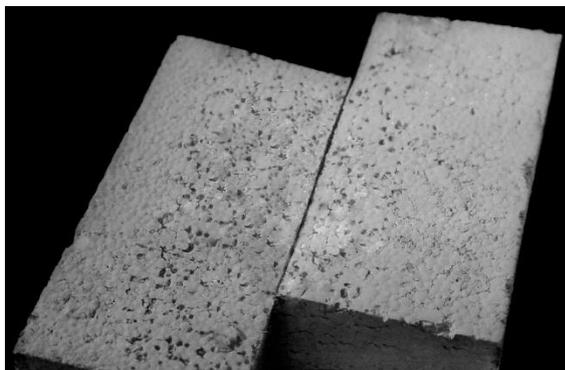


Рис.3 – Легковаговий ячеїстозаповнений вогнетрив після експлуатації при 1250°C (суміжні боки)

В зоні нижчих за 1000°C температур спучений перліт в ячейках каркасу виконував свої теплоізоляційні функції. Оптимальним, щодо міцності і щільності, ми вважаємо склад з об'ємом каркасу (10±20)% і діаметром гранул 5÷10 мм [4,5].

Висновки. Віброімпульсне формування, як найефективніший спосіб рівнощільної укладки поліфракційних порошкових систем використовують для формування виробів складної конфігурації і великих розмірів [6].

Ми вжили цей метод у поєднанні з інерційним довантаженням, оскільки він дозволяв формувати вироби з крихких гранул, не руйнуючи їхньої цілостності.

Список літератури

1. В.Б. Устьянов, В.В. Иващенко Ячеїстозаполненные материалы, тенденции и перспективы. «Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века», № 2, 2014, с 18-20.
2. В.Б. Устьянов, В.В. Иващенко и др. Шамотный огнеупор с ячеїстозаполненной структурой. Огнеупоры. 1988, № 12.
3. V.B. Ust'yanov, V.V. Ivashchenko, D. I. Chagin, B. A. Savinov, V. S. Obnrmikhin Refractories and Industrial Ceramic, November–December, 1988, Volume 29, Issue 11-12, p. 711-712.
4. В.Б. Устьянов, В.В. Иващенко Новая технология легковесных огнеупоров. «Формование порошковых материалов» (краткие тезисы докладов). Ленинград, 1979.
5. В.Б. Устьянов, В.В. Иващенко и др. Виброформование огнеупорных изделий из гранулированных материалов. «Формование порошковых материалов» (краткие тезисы докладов). Ленинград, 1979.
6. В.В. Иващенко Віброімпульсне формування виробів із порошків – унікальна технологія для нових матеріалів. «Прогресивна техніка і технологія». «Машинобудування, приладобудування і зварювальне виробництво». Праці міжнародної науково-технічної конференції. 1998.

Bibliography (transliterated)

1. V.B. Ustianov. V.V. Ivashchenko. Yacheїstozapolnennyye materialy. tendentsii i perspektivy. «Stroitelnyye materialy. oborudovaniye. tekhnologii KhKhI veka». No 2. 2014. p/ 18-20.
2. V.B. Ustianov. V.V. Ivashchenko i dr. Shamotnyy ogneupor s yacheїstozapolnenoй strukturoy. Ogneupory. 1988 No 12.
3. V.B. Ust'yanov, V.V. Ivashchenko, D. I. Chagin, B. A. Savinov, V. S. Obnrmikhin. Refractories and Industrial Ceramic, November–December, 1988, Volume 29, Issue 11-12, p. 711-712.
4. V.B. Ustianov. V.V. Ivashchenko. Novaya tekhnologiya legkovesnykh ogneuporov. «Formovaniye poroshkovykh materialov» (kratkiye tezisy докладов). Leningrad. 1979.
5. V.B. Ustianov. V.V. Ivashchenko i dr. Vibroformovaniye ogneupornykh izdeliy iz granulirovanykh materialov. «Formovaniye poroshkovykh materialov» (kratkiye tezisy докладов). Leningrad. 1979.
6. V.V. Ivashchenko. Vibroimpulsne formuvannya virobiv iz poroshkiv – unikalna tekhnologiya dlya novikh materialiv. «Progresivna tekhnika i tekhnologiya». «Mashinobuduvannya. priladobuduvannya i zvaryvalne виробництво». Pratsi mizhnarodnoї naukovo-tekhnichnoї konferentsii. 1998.

Поступила (received) 28.11.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Статическая и вибрационная формовка ячеїстозаполненных огнеупоров / В.Б. Устьянов, В. В. Иващенко // Вестник НТУ «ХПИ». Серия: Инновационные технологии и оборудование обработки материалов в машиностроении и металлургии. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2017. – № 43 (1265). – С. 68–71. – Библиогр.: 6 назв– ISSN 2519-2671.

Статичне та вібраційне формування ячеїстозаповнених вогнетривів / В.Б. Устьянов, В. В. Иващенко // Вестник НТУ «ХПИ». Серия: Инновационные технологии и оборудование обработки материалов в машиностроении и металлургии. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2017. – № 43 (1265). – С. 68–71. – Библиогр.: 6 назв– ISSN 2519-2671.

Static and vibratory molding of cellular filled refractories / V. Ustyanov, V. Ivashchenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Innovative technologies and equipment for processing materials in engineering and metallurgy. – Kharkov: NTU "KhPI", 2017. – No43 (1265). – P. 68–71. – Bibl: 6. – ISSN 2519-2671.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Устьянов Володимир Борисович – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник кафедри механіки пластичності матеріалів та ресурсозберігаючих процесів НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського». Адреса: 02166, вул. Курчатова, 15, кв. 34. Тел. 097-590-13-12, e-mail: svetaharsiki@gmail.com.

Устьянов Владимир Борисович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник кафедры механики пластичности материалов и ресурсосберегающих процессов НТУУ «КПИ им. И. Сикорского». Адрес: 02166, Киев, ул. Курчатова, 15, кв. 34, тел. Тел. 097-590-13-12. e-mail: svetaharsiki@gmail.com.

Ustyanov Volodymyr – candidate of technical sciences, senior researcher at the department of Mechanics of plasticity of materials and resource-saving processes, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”. Contact details: Phone: +38097-590-13-12 e-mail: svetaharsiki@gmail.com.

Іващенко Віталій Вадимович – кандидат технічних наук, доцент кафедри механіки пластичності матеріалів та ресурсозберігаючих процесів НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського». Адреса: 03110, Київ, вул. Олексіївська, 5, кв.30. Тел. 096-216-58-59, e-mail: vivashchenko@ukr.net.

Иващенко Виталий Вадимович – кандидат технических наук, доцент кафедры механики пластичности материалов и ресурсосберегающих процессов НТУУ «КПИ им. И. Сикорского». Адрес: 03110, Киев, ул. Алексеевская, 5, кв. 30. Тел. 096-216-59-58, e-mail: vivashchenko@ukr.net.

Ivashchenko Vitaliy – candidate of technical sciences, lecturer at the department of Mechanics of plasticity of materials and resource-saving processes, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”. Contact details: Phone: +38096-216-59-58, e-mail: vivashchenko@ukr.net.

УДК 621.771

Ю. Г. ГУЛЯЕВ, Е. И. ШИФРИН, Я. В. ФРОЛОВ, О. А. РЕМЕЗ

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ МЕТОДА БАЛАНСА РАБОТ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ СИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОКАТКИ

Запропоновано інтерпретацію методу балансу робіт при вирішенні задач теорії прокатки. Проведено теоретичне визначення складових балансу робіт сил, що впливають на метал при плоскій деформації штаби в ході процесу прокатки. Отримано значення дійсного коефіцієнту підпору. Представлені графічні порівняння уточненого граничного значення коефіцієнта підпору і відносного середнього тиску при прокатці високих штаб, з раніш відомими результатами. Отримані результати використані при розрахунку силових параметрів безоправочної поздовжньої прокатки труб.

Ключові слова: метод робіт, очаг деформації, вертикальна сила, нейтральне перетин, робота деформації, баланс робіт, коефіцієнт підпору, відносний середній тиск, коефіцієнт тертя.

Предложена интерпретация метода баланса работ при решении задач теории прокатки. Теоретически определены составляющие баланса работ сил, воздействующих на металл при плоской деформации полосы в ходе процесса прокатки. Получены значения истинного коэффициента подпора. Представлены графические сравнения уточненного предельного значения коэффициента подпора и относительного среднего давления при прокатке высоких полос, с ранее известными результатами. Полученные результаты использованы при расчете силовых параметров безоправочной продольной прокатки труб.

Ключевые слова: метод работ, очаг деформации, вертикальная сила, нейтральное сечение, работа деформации, баланс работ, коэффициент подпора, относительное среднее давление, коэффициент трения.

The development of the "Mechanical Work Balance" Method at solving of Theory of Rolling Tasks is offered in this study. Force elements of that Balance, that impact on the Metal at flat Rolling are theoretically derivated here. Amounts of true values of Back Compression factor are calculated. Furthermore, in this paper the calculated limit value of Back-Compression and the Relative Rolling Pressure for high plates are graphically compared with known values of these parameters. Results of this study allow to consider the inhomogeneity of strain in cross section of deformation zone. Offered "Mechanical Work Balance" Method is sensible to Friction Coefficient, Form Factor of deformation zone, and their influence on Average Rolling Pressure. That Method is verified for wide range of geometries of deformation zone. "Mechanical Work Balance" Method is appropriated for the case, then direction of outer force is coincided to the Major Strain direction. Inner forces are directed oppositely here. The examples of application of that Method for rolling of relatively thin and thick strips is given. It is shown, that the slicking zone in case of rolling of thin strips covers whole length of deformation zone. The values of Back-Compression coefficient were verified for different geometries of deformation zone. They could be applied to the all stages of seamless tubes rolling, including the Plugless Tubes Rolling.

Keywords: Mechanical Work Method, Deformation Zone, Vertical Rolling Force, Neutral Cross Section, The Work of Deformation, Work Balance, Back Compression, Average Rolling Pressure, Friction Coefficient.

Введение. При использовании метода работ в традиционной постановке рассматривают баланс работы активных внешних сил, под действием которых происходит деформация металла (работа A_a), внутренних сил, препятствующих деформации металла (работа A_d), и внешних сил, препятствующих перемещению металла по контактной поверхности (работа A_r) [1, стр. 343]. В такой постановке метод на практике использован только при анализе простейших задач теории пластичности, а именно, – при осадке прямоугольной полосы и цилиндра между шероховатыми плитами.

Цель работы. Расширение возможностей метода баланса работ и применение его для аналитического изучения силовых параметров прокатки. Для достижения поставленной цели предлагается рассматривать баланс работы A_d сил, препятствующих деформации металла, и работ сил, совпадающих с направлениями главных деформаций.

Постановка задачи. Принимаем допущение о том, что деформация плоская, т.е. длина очага деформации l_d намного меньше ширины полосы b (рис. 1). Ширина полосы b не изменяется в процессе деформации.

Необходимо определить составляющие баланса работ сил, воздействующих на металл при плоской деформации полосы в ходе процесса прокатки. Рассматриваем параметры течения (перемещения) деформируемого металла относительно поверхности валка. В нейтральном сечении (рис. 1), имеющем угловую координату γ , металл неподвижен относительно поверхности валка. В зонах отставания ($\phi_x > \gamma$) и опережения ($\phi_x < \gamma$) силы контактного трения t_k , обусловленные наличием напряжений контактного трения $\tau_k = \tau_{cp}$, направлены по отношению к направлению перемещения металла относительно поверхности валка, препятствуют этому перемещению (создают «подпор»).

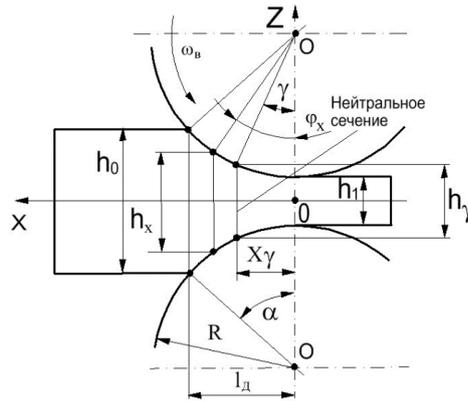


Рис. 1 – Схема прокатки полосы

Деформация рассматривается как плоская, поэтому главные деформации – это обжатие ε_z и вытяжка ε_x .

Решение задачи. Определим работу A_z сил, действующих в направлении обжатия (вдоль оси Z), и работу A_x сил, действующих в направлении вытяжки (вдоль оси X).

Работа сил в направлении обжатия. Элементарные абсолютные обжатия dh_x каждого сечения высотой h_x на элементарном участке очага деформации длиной dx составляют величину (рис. 2)

$$dh_x = 2dx \cdot \tan \phi_x, \quad (1)$$

где $\phi_x = \arcsin \frac{x}{R}$ – угловая координата;

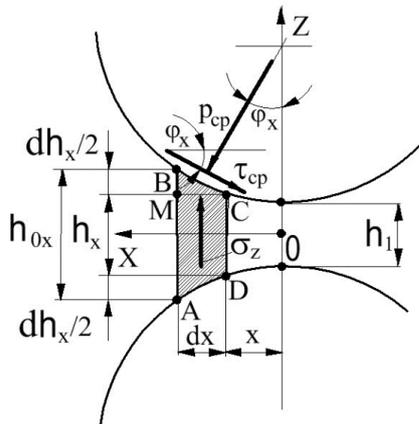


Рис. 2 – Схема силового взаимодействия (для элемента в зоне отставания)

Верхний знак в уравнениях (2)-(3) и всех последующих формулах относится к зоне отставания ($\phi_x > \gamma$), нижний – к зоне опережения ($\phi_x < \gamma$). Заметим, что, если принять, что условие статического равновесия элемента MBC (рис. 2) имеет вид $dP_z \approx -\sigma_z \cdot b \cdot dx$, то, подставив значение dP_z в уравнение (3), получаем

$$\sigma_z = (p_{cp} \pm \tau_{cp} \tan \phi_x). \quad (4)$$

x – линейная координата, считая за “нуль” сечение выхода из очага деформации.

Элементарная вертикальная сила dP_z , действующая в направлении перемещения $du_z = -\frac{dh_x}{2}$, определится как проекция на ось Z сил, действующих на площадке контактной поверхности BC (рис. 2):

$$dP_z = -p_{cp} b \left(\frac{dx}{\cos \phi_x} \right) \cos \phi_x \mp \tau_{cp} b \left(\frac{dx}{\cos \phi_x} \right) \sin \phi_x \quad (2)$$

Преобразовывая уравнение (2) dP_z , получаем

$$dP_z = (\mp \tau_{cp} \tan \phi_x - p_{cp}) b \cdot dx. \quad (3)$$

На каждом элементарном участке очага деформации длиной dx элементарная сила dP_z совершает “дважды” элементарную работу на перемещениях du_z (вследствие симметрии здесь и далее рассматриваем один валок и “верхнюю” половину очага деформации), равную

$$d^2 A_z = dP_z \left(-\frac{dh_x}{2} \right) = -dP_z dx \tan \phi_x. \quad (5)$$

В соответствии с уравнением (5) суммарная для 1/2 очага деформации элементарная работа dA_z определится следующим образом:

$$dA_z = \int (-dP_z \cdot \tan \phi_x) dx. \quad (6.1)$$

Подставляя (3) в (6.1), получаем:

$$dA_z = \int_0^{x_y} [(p_{cp} - \tau_{cp} \tan \phi_x) b \tan \phi_x \cdot dx] dx + \\ + \int_{x_y}^{l_d} [(p_{cp} + \tau_{cp} \tan \phi_x) b \tan \phi_x \cdot dx] dx,$$

где $x_y = R \sin \gamma$ – осевая координата нейтрального сечения.

После приведения подобных в последнем уравнении, получаем (формула 6.2)

$$dA_z = \left\{ p_{cp} \int_0^{l_d} \tan \phi_x dx - \tau_{cp} \left[\int_0^{x_y} \tan^2 \phi_x dx - \int_{x_y}^{l_d} \tan^2 \phi_x dx \right] \right\} b \cdot dx$$

Работа сил в направлении вытяжки. Положение нейтрального сечения определим из условия равновесия объёма металла, находящегося в “верхней” части очага деформации, под действием приложенных к нему со стороны одного валка сил. Запишем уравнение статического равновесия сил ΣX в направлении оси X

$$\Sigma X = \int_{\gamma}^{\alpha} p_{cp} R \sin \phi d\phi - \int_{\gamma}^{\alpha} \tau_{cp} R \cos \phi d\phi + \\ + \int_0^{\gamma} p_{cp} R \sin \phi d\phi + \int_0^{\gamma} \tau_{cp} R \cos \phi d\phi = 0 \quad (7)$$

После интегрирования и решения уравнения (7), получаем (формула 8.1):

$$\gamma = \arcsin \left[\frac{p_{cp} (\cos \alpha - 1) + \tau_{cp} \sin \alpha}{2\tau_{cp}} \right].$$

Если принять в соответствии законом Амонтона – Кулона (закон трения скольжения), что $\tau_{cp} = fp_{cp}$ (здесь f – коэффициент трения), то из (8.1) получим:

$$\gamma = \arcsin \left(\frac{\cos \alpha - 1 + f \sin \alpha}{2f} \right). \quad (8.2)$$

Если принять в соответствии с условием Зибеля, что $\tau_{cp} = f_{\sigma} \sigma^*$ (здесь f_{σ} – показатель трения, $\sigma^* = \beta \sigma_T$; $\beta = \frac{2}{\sqrt{3}}$ – коэффициент Лодэ; σ_T – предел текучести деформируемого материала), то из (8.1) получим:

$$\gamma = \arcsin \left[\frac{n_{\sigma cp} (\cos \alpha - 1) + f_{\sigma} \sin \alpha}{2f_{\sigma}} \right], \quad (8.3)$$

где $n_{\sigma cp} = \frac{p_{cp}}{\sigma^*}$.

Заметим, что:

– формула (8.2) определяет *точное* значение угла нейтрального сечения γ при прокатке, но, если в (8.2)

подставить $\cos \alpha \approx 1 - \frac{\alpha^2}{2}$ и $\sin \alpha \approx \alpha$, получим *приближенное* значение угла γ в виде формулы Экелунда–Павлова:

$$\gamma = \arcsin \left(\frac{f\alpha - \frac{\alpha^2}{2}}{2f} \right) = \\ = \arcsin \left[\frac{\alpha}{2} \left(1 - \frac{\alpha}{2f} \right) \right] \approx \frac{\alpha}{2} \left(1 - \frac{\alpha}{2f} \right);$$

– приняв в (8.2) $\gamma = 0$, получаем известную формулу для определения значения максимально возможного угла захвата $\alpha_{\max} = 2 \arctan f$.

Элементарная относительная высотная деформация в сечении очага с координатой X составляет величину:

$$d\varepsilon_z = \frac{-2dh_x}{h_x} = \frac{-2 \tan \phi_x}{h_1 + 2R(1 - \cos \phi_x)} \cdot dx. \quad (9)$$

Элементарные высотные перемещения du_z металла в очаге деформации определяются как:

$$du_z = \int_0^z (d\varepsilon_z) dz = \frac{-2z \tan \phi_x}{h_1 + 2R(1 - \cos \phi_x)} \cdot dx. \quad (10)$$

Формула (10) удовлетворяет граничным условиям для высотных перемещений:

1. При $z = 0$ (т.е. на оси симметрии) $du_z = 0$.
2. При $z = \pm \frac{h_x}{2}$ (т.е. на контактной поверхности) $du_z = \mp dh_x$.

В соответствии с условием несжимаемости $d\varepsilon_x = -d\varepsilon_z$ и элементарная величина горизонтальных перемещений металла относительно нейтрального сечения определится как

$$d(\Delta u_x) = \int_{x_y}^x (d\varepsilon_x) dx = U_x \cdot dx, \quad (11)$$

$$\text{где } U_x = \ln \left[\frac{\frac{h_1}{R} + 2 \left(1 - \sqrt{1 - \frac{x^2}{R^2}} \right)}{\frac{h_1}{R} + 2(1 - \cos \gamma)} \right] = \ln \frac{h_x}{h_y}.$$

Элементарная горизонтальная сила $dP_x = -bh_x d\sigma_x$, действующая в направлении относительного перемещения металла по поверхности

валка $d(\Delta u_x)$, определится как проекция на ось X сил, действующих на площадках контактной поверхности BC и AD (рис. 2):

$$dP_x = 2 \left[p_{cp} b \left(\frac{dx}{\cos \phi_x} \right) \sin \phi_x \mp \tau_{cp} b \left(\frac{dx}{\cos \phi_x} \right) \cos \phi_x \right].$$

Из последнего уравнения получаем:

$$dP_x = 2 \left(p_{cp} \tan \phi_x \mp \tau_{cp} \right) b \cdot dx. \quad (12)$$

В соответствии с (12) элементарная работа dA_x горизонтальной силы dP_x на горизонтальных перемещениях $d(\Delta u_x)$ для $1/2$ очага деформации составит величину

$$dA_x = \int_0^{x_y} \left[\left(p_{cp} \tan \phi_x + \tau_{cp} \right) b U_x \cdot dx \right] dx + \int_{x_y}^{l_d} \left[\left(p_{cp} \tan \phi_x - \tau_{cp} \right) b U_x \cdot dx \right] dx. \quad (13)$$

После приведения подобных уравнение (13) принимает вид

$$dA_x = \left\{ p_{cp} \left[\int_{x_y}^{l_d} U_x \tan \phi_x dx - \int_0^{x_y} U_x \tan \phi_x dx \right] - \tau_{cp} \int_0^{l_d} U_x dx \right\} b \cdot dx \quad (14)$$

Работа деформации. Элементарная работа пластического формоизменения dA_d для $1/2$ объема очага при *плоской деформации* определится следующим образом:

$$dA_d = b \int_0^{l_d} \int_0^{\frac{h_x}{2}} \sigma_T d\varepsilon_i dz dx, \quad (15)$$

где $d\varepsilon_i = \beta \cdot \sqrt{d\varepsilon_x^2 + \frac{1}{4} \cdot (d\gamma_{xz})^2}$ – элементарная интенсивность плоской деформации;

$d\gamma_{xz} = \frac{d}{dz}(d(\Delta u_x)) + \frac{d}{dx}(du_z)$ – элементарная сдвиговая деформация.

В соответствии с полученным законом (11) элементарное осевое перемещение металла $d(\Delta u_x)$ не зависит от координаты z , т.е. соблюдается гипотеза “плоских вертикальных сечений”. Элементарные вертикальные перемещения du_z в соответствии с (10) зависят от координаты x . Таким образом, элементарные сдвиговые деформации $d\gamma_{xz}$ в произвольной точке очага составят величину:

$$d\gamma_{xz} = \frac{2z}{Rh_x \cos \phi_x} \times \left[\frac{x^2}{R^2 \cos^2 \phi_x} \left(\frac{2R \cos \phi_x}{h_x} - 1 \right) - 1 \right] \cdot dx. \quad (16)$$

Элементарная интенсивность плоской деформации $d\varepsilon_i$ в произвольной точке очага составит величину (формула 17):

$$d\varepsilon_i = \frac{\beta}{h_x} \times \sqrt{4 \tan^2 \phi_x + \frac{z^2}{R^2 \cos^2 \phi_x} \left[\frac{x^2}{R^2 \cos^2 \phi_x} \left(\frac{2R \cos \phi_x}{h_x} - 1 \right) - 1 \right]^2} \cdot dx$$

Подставляя (17) в (15), получаем, что элементарная работа пластического формоизменения dA_d для $1/2$ объема очага деформации при *плоской деформации* полосы в процессе прокатки определится следующим образом:

$$dA_d = \left\{ \int_0^{l_d} \int_0^{\frac{h_x}{2}} \frac{b\sigma^*}{h_x} \sqrt{4 \tan^2 \phi_x + \frac{z^2}{R^2 \cos^2 \phi_x} \left[\frac{x^2}{R^2 \cos^2 \phi_x} \left(\frac{2R \cos \phi_x}{h_x} - 1 \right) - 1 \right]^2} dz dx \right\} \cdot dx \quad (18)$$

Если считать допустимым использование гипотезы о возможности пренебрежения сдвиговыми деформациями (т.е. гипотезы об однородности деформации) при прокатке, то элементарная интенсивность *плоской однородной деформации* ε_{io} в произвольной точке очага определится из уравнения

$$d\varepsilon_{io} = \frac{2 \tan \phi_x}{h_1 + 2R(1 - \cos \phi_x)} \cdot dx. \quad (19)$$

Соответственно, элементарная работа *плоской однородной деформации* dA_{do} для $1/2$ объема очага деформации определится следующим образом:

$$dA_{do} = b\sigma^* \left\{ \int_0^{l_d} \int_0^{\frac{h_x}{2}} \frac{2 \tan \phi_x}{h_1 + 2R(1 - \cos \phi_x)} dz dx \right\} \cdot dx \quad (20.1)$$

Проведя интегрирование в уравнении (20.1), после некоторых преобразований получаем окончательно

$$dA_{do} = b\sigma^* \frac{\Delta h}{2} \cdot dx. \quad (20.2)$$

Общее уравнение баланса работ имеет вид:

- для *плоского неоднородного* формоизменения:

$$dA_x + dA_z = dA_d. \quad (21.1)$$

- для *плоской однородной* деформации:

$$dA_x + dA_z = dA_{do}. \quad (21.2)$$

Подставив (6.2), (14) и (20.2) в уравнение (21.2), имеем:

$$\left\{ p_{cp} \left[\int_{x_\gamma}^{l_d} U_x \tan \phi_x dx - \int_0^{x_\gamma} U_x \tan \phi_x dx \right] - \tau_{cp} \int_0^{l_d} U_x dx \right\} b \cdot dx +$$

$$+ \left\{ p_{cp} \frac{\Delta h}{2} - \tau_{cp} \left[\int_0^{x_\gamma} \tan^2 \phi_x dx + \int_{x_\gamma}^{l_d} \tan^2 \phi_x dx \right] \right\} b \cdot dx =$$

$$= b \sigma^* \frac{\Delta h}{2} \cdot dx.$$

Разделим правую и левую части последнего уравнения на $b \sigma^* dx$ и после простых преобразований получим:

- для $\tau_{cp} = fp_{cp}$:

$$n_{\sigma_{cp}} \left[\int_{x_\gamma}^{l_d} U_x \tan \phi_x dx - \int_0^{x_\gamma} U_x \tan \phi_x dx + \frac{\Delta h}{2} \right] -$$

$$- fn_{\sigma_{cp}} \left[\int_0^{x_\gamma} \tan^2 \phi_x dx - \int_{x_\gamma}^{l_d} \tan^2 \phi_x dx + \int_0^{l_d} U_x dx \right] - \frac{\Delta h}{2} = 0; \quad (22.1)$$

- для $\tau_{cp} = f_\sigma \sigma^*$:

$$n_{\sigma_{cp}} \left[\int_{x_\gamma(n_{\sigma_{cp}})}^{l_d} U_x \tan \phi_x dx - \int_0^{x_\gamma(n_{\sigma_{cp}})} U_x \tan \phi_x dx + \frac{\Delta h}{2} \right] -$$

$$- f_\sigma \left[\int_0^{x_\gamma(n_{\sigma_{cp}})} \tan^2 \phi_x dx - \int_{x_\gamma(n_{\sigma_{cp}})}^{l_d} \tan^2 \phi_x dx + \int_0^{l_d} U_x dx \right] - \frac{\Delta h}{2} = 0. \quad (22.2)$$

Таким образом, для закона трения $\tau_{cp} = fp_{cp}$ величина коэффициента подпора $n_{\sigma_{cp}} = n_{\sigma_{до}}(f)$ при плоской однородной деформации определится как

корень уравнения (22.1), в котором угол \mathcal{U} рассчитывается по уравнению (8.2). Для условия трения $\tau_{cp} = f_\sigma \sigma^*$ величина коэффициента подпора $n_{\sigma_{cp}} = n_{\sigma_{до}}(f_\sigma)$ при плоской однородной деформации определится как корень уравнения (22.2), в котором угол \mathcal{U} рассчитывается по уравнению (8.3), т.е. в этом случае $n_{\sigma_{cp}} = n_{\sigma_{до}}(f_\sigma)$ определится как корень уравнения (22.2), в котором $x_\gamma = x_\gamma(n_{\sigma_{cp}})$.

Аналогично, подставив (6.2), (14) и (18) в уравнение (21.1), получаем уравнения, корнями которого будут: при $\tau_{cp} = fp_{cp}$ – коэффициент подпора $n_{\sigma_{cp}} = n_{\sigma_{д}}(f)$; при $\tau_{cp} = f_\sigma \sigma^*$ – коэффициент подпора $n_{\sigma_{cp}} = n_{\sigma_{д}}(f_\sigma)$ при плоском неоднородном формоизменении.

Учитывая тождественность уравнения метода работ и уравнения пластичности [2], можно сказать, что коэффициент подпора $n_{\sigma_{до}}$ определяется при допущении о том, что касательными (сдвиговыми) напряжениями τ_{xz} можно пренебречь и что условие пластичности имеет вид $\sigma_x - \sigma_z = \sigma^*$. Значения $n_{\sigma_{д}}$ соответствуют условию пластичности в виде уравнения $\sqrt{(\sigma_x - \sigma_z)^2 + 4\tau_{xz}^2} = \sigma^*$.

Тестовые расчёты и анализ результатов. На рис. 3 представлены результаты расчета относительного среднего давления (коэффициента подпора) $n_{\sigma_{до}}$ при плоской однородной деформации как функции показателя трения f_σ и обобщенного показателя формы очага деформации $\bar{L} = \frac{l_d}{h_{cp}}$.

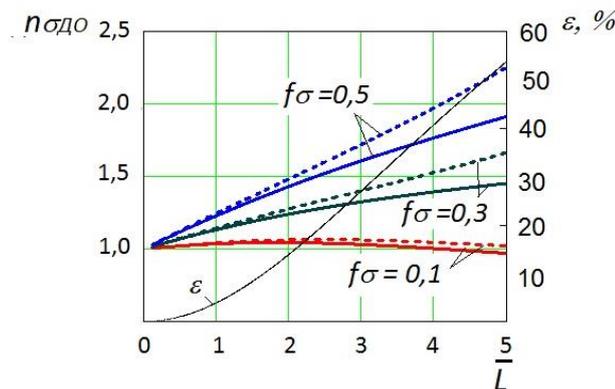


Рис. 3 – Расчетные значения $n_{\sigma_{cp}} = n_{\sigma_{до}}(f_\sigma)$; $\bar{R} = 25$, $R = 500$ мм

Учитывая, что длина очага деформации равна $l_d = R \sin \alpha$, угол захвата равен $\alpha = \sin \left[\arccos \left(1 - \frac{\Delta h}{2R} \right) \right] = \sqrt{\frac{\Delta h}{2R} \left(2 - \frac{\Delta h}{2R} \right)}$, абсолютное обжатие полосы равно $\Delta h = h_0 - h_1 = h_0(1 - \varepsilon)$ и средняя высота полосы

составляет величину $h_{cp} = \frac{h_0 + h_1}{2} = \frac{2\bar{R}}{2 - \varepsilon}$, показатель \bar{L} связан с другими параметрами деформации уравнением

$$\bar{L} = \frac{2\bar{R}}{2 - \varepsilon} \cdot \sqrt{\frac{\varepsilon}{2\bar{R}} \left(2 - \frac{\varepsilon}{2\bar{R}} \right)}, \quad (23)$$

где $\varepsilon = \frac{\Delta h}{h_0}$ – относительная высотная деформация
полосы;

$\bar{R} = \frac{R}{h_0}$ – показатель толщины полосы.

Сплошные линии на рис. 3 – расчет по уравнению (22.2), штриховые линии – расчет по формуле А. П. Чекмарёва [3, формула 11]. Расхождения в результатах расчетов по формуле А. П. Чекмарёва и формуле (22.2), которые для представленных на рис. 3 данных не превышают +15 %, объясняются тем, что при выводе формулы А. П. Чекмарёва принято допущение, в соответствии с которым $\sigma_z = p_x$ (здесь p_x – переменное по

контактной поверхности контактное давление), а при выводе формулы (22.2) напряжение σ_z и контактное давление p_{cp} связаны соотношением (4).

На рис. 4 представлены результаты расчета относительного среднего давления $n_{\sigma_{до}}$ при плоской однородной деформации как функции относительного обжатия ε и показателя толщины полосы \bar{R} при $f_{\sigma} = 0,5$. Сплошные линии на рис. 4 – расчет по уравнению (22.2), штриховые линии – расчет по формуле А. П. Чекмарёва. Расхождения в результатах расчетов по формуле А. П. Чекмарёва и формуле (22.2), для представленных на рис. 4 данных не превышают +15,5 %.

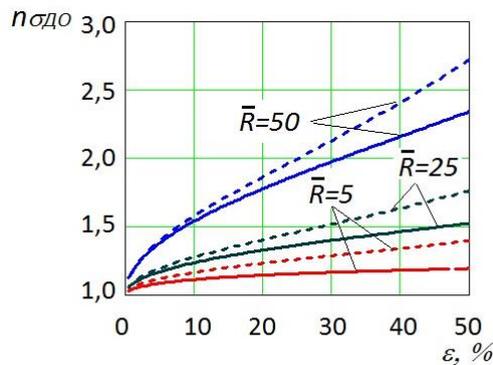


Рис. 4 – Расчетные значения $n_{\sigma_{до}} (f_{\sigma} = 0,5)$; $h_0 = 20$ мм

На рис. 5 представлены результаты расчета относительного давления (коэффициента подпора) $n_{\sigma_{до}}$ при плоской однородной деформации как функции коэффициента трения f и обобщенного показателя формы очага деформации $\bar{L} = \frac{l_d}{h_{cp}}$.

Сплошные линии на рис. 5 – расчет по уравнению (22.1), штриховые линии – средняя величина относительного контактного давления

$$n_{\sigma_{д}} = \frac{1}{l_d \sigma^*} \left[\int_0^{x_{\gamma}} p_{on}(x) dx + \int_{x_{\gamma}}^{l_d} p_{om}(x) dx \right], \quad (24)$$

где $p_{on}(x)$, $p_{om}(x)$ – точное решение уравнения Т.Кармана $dp \pm fp \frac{dx}{h_x} - \sigma^* \frac{dh_x}{h_x} = 0$ для зон опережения и отставания очага деформации, предложенное в работе [4, формула 1.26]).

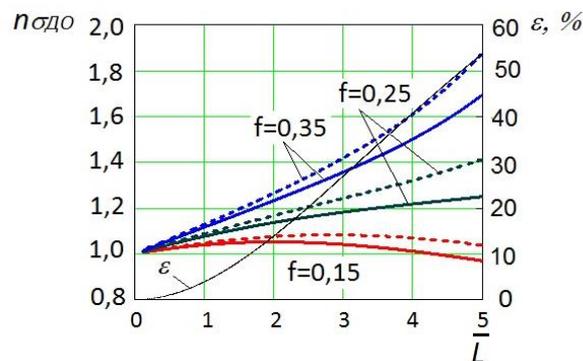


Рис. 5 – Расчетные значения $n_{\sigma_{до}} (f)$; $\bar{R} = 25$, $R = 500$ мм

Імаючіе место расхожденія в результатах расчетов, которые для представленных на рис. 5 данных составляют до +11,5%, объясняются теми же факторами, что и для рис. 3.

На рис. 6 представлены результаты расчета относительного среднего давления $n_{\sigma_{до}}$ при плоской однородной деформации как функции относительного обжатия ε и показателя толщины полосы \bar{R} при $f = 0,35$. Сплошные линии на рис. 4 – расчет по уравнению (22.1), штриховые линии – расчет по формуле (24). Расхождения в результатах расчетов по формуле (24) и формуле (22.1) для представленных на рис. 6 данных составляет (+9,8...–32,1) % и объясняется теми же факторами, что и для рис. 3.

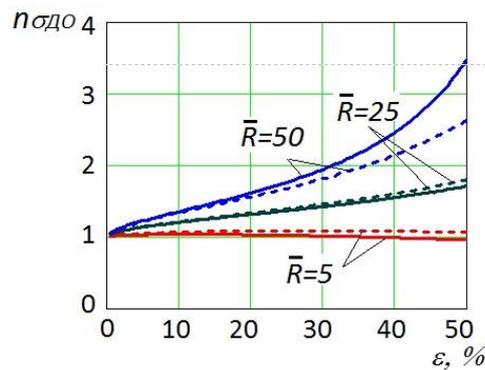


Рис. 6 – Расчетные значения $n_{\sigma_{до}} = n_{\sigma_{до}}(f = 0,35)$; $h_0 = 20$ мм

Как следует из приведенных на рис. 7 и 8 данных, в области $\bar{L} > 2$ значения $n_{\sigma_{до}}$ и $n_{\sigma_{д}}$ практически совпадают. При $\bar{L} < 2$ качественный характер зависимостей $n_{\sigma_{до}}$ и $n_{\sigma_{д}}$ существенно различается. Для высоких (толстых) полос (при $\bar{L} < 0,75...1,0$) функции $n_{\sigma_{д}}$ монотонно возрастают с уменьшением показателя \bar{L} , а функции $n_{\sigma_{до}}$, напротив, – монотонно уменьшаются.

На рис. 7 представлены расчётные значения коэффициентов подпора $n_{\sigma_{до}}(f_{\sigma})$ при плоской однородной деформации и $n_{\sigma_{д}}(f_{\sigma})$ при плоской неоднородной деформации как функций показателя формы очага деформации \bar{L} и показателя трения f_{σ} . На рис. 8 представлены расчётные значения $n_{\sigma_{до}}(f)$ и $n_{\sigma_{д}}(f)$ как функций \bar{L} и коэффициента трения f . На рис. 7 и 8 зависимости $n_{\sigma_{до}}$ показаны сплошными, а зависимости $n_{\sigma_{д}}$ – штриховыми линиями.

Характер изменения функций $n_{\sigma_{д}}$ при $\bar{L} < 0,75...1$ коррелируется с изменением величины коэффициента подпора n_o (точки на рис. 7 и 8), рассчитанной по формуле А. И. Целикова [5, формула III. 69], которая может быть использована только при $\bar{L} < 1$.

В переходной зоне $0,75...1 < \bar{L} < 2$ характер изменения функции $n_{\sigma_{д}}$ отличается как от характера изменения функции $n_{\sigma_{до}}$, так и функции n_o .

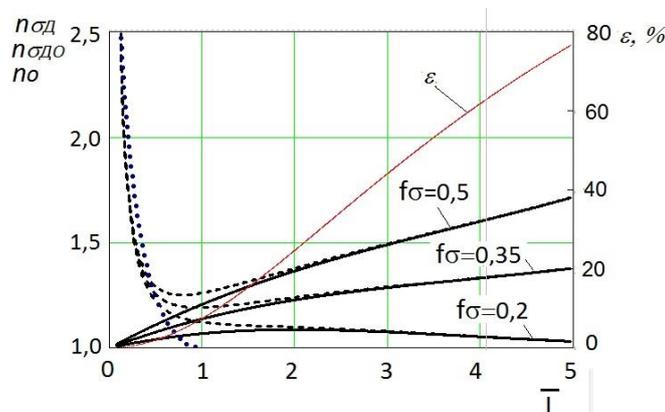


Рис. 7 – Расчетные значения $n_{\sigma_{д}}(f_{\sigma})$, $n_{\sigma_{до}}(f_{\sigma})$ и n_o ; $\bar{R} = 12,5$, $R = 250$ мм

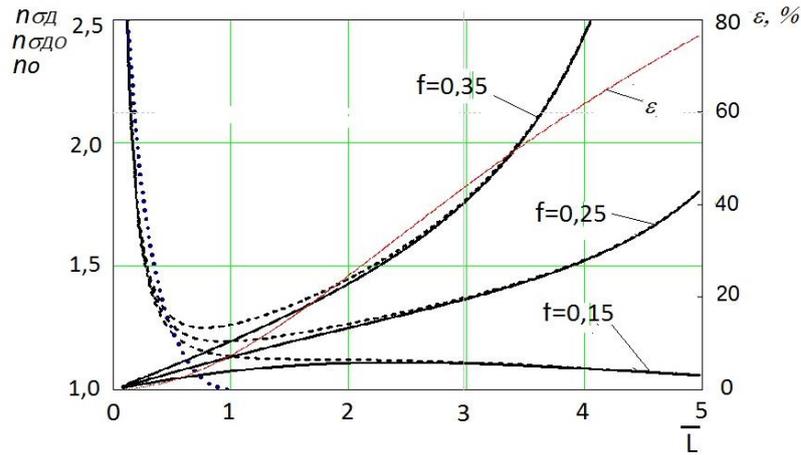


Рис. 8 – Расчетные значения $n_{\sigma_d}(f)$, $n_{\sigma_{до}}(f)$ и n_o ; $\bar{R} = 12,5$, $R = 250$ мм

По применяемым до настоящего времени рекомендациям для определения значений коэффициента подпора при прокатке толстых ($\bar{L} < 1$) и тонких ($\bar{L} > 1$) полос следует использовать две разные методики расчёта [5–7 и др.]. Предложенная методика отличается от ранее применяемых универсальностью, которая заключается в том, что при её использовании расчётный коэффициент подпора n_{σ_d} учитывает влияние безразмерных геометрических параметров \bar{L} , \bar{R} и условий контактного взаимодействия (через значения f или f_{σ}) на среднее контактное давление p_{cp} при прокатке полос во всем возможном диапазоне значений показателя \bar{L} ($0 < \bar{L} < \infty$).

Уточнение методики. Известно, что при пластической деформации возможность использования закона трения скольжения $t_x = fp_x$ на всей контактной поверхности ($0 < x < l_d$) ограничена условием [4, стр. 25]:

$$2n_{\sigma_x}f < 1, \quad (25.1)$$

где n_{σ_x} – переменный по длине очага деформации коэффициент подпора.

Исходя из условия (25) сформулируем **первое** граничное условие использования закона трения скольжения $t_{cp} = fp_{cp}$ следующим образом:

$$2n_{\sigma_{x\max}}f = 1, \quad (25.2)$$

где $n_{\sigma_{x\max}}$ – максимальное по длине очага деформации значение коэффициента подпора.

В соответствии с условием (25.2) расчётные значения коэффициента подпора $n_{\sigma_{cp}} = n_{\sigma_d}(f)$

являются достоверными до тех пор, пока выполняется условие:

$$n_{\sigma_{x\max}} < \frac{1}{2f}. \quad (25.3)$$

При невыполнении условия (25.3) на части контактной поверхности имеет место зона прилипания, где взаимное скольжение металла относительно валков отсутствует. Исходя из принципа минимума энергетических затрат, будем считать, что зона прилипания распространится на всю контактную поверхность при выполнении **второго** граничного условия:

$$n_{\sigma_d}(f) = n_{\sigma_d}(f_{\sigma} = 0,5). \quad (25.4)$$

Для условий прокатки, при которых $n_{\sigma_d}(f) > n_{\sigma_d}(f_{\sigma} = 0,5)$, или, что то же самое $n_{\sigma_d}(f) > \frac{1}{2f}$, достоверное (истинное) значение коэффициента подпора $n_{\sigma_{срн}}$ определится из условия:

$$n_{\sigma_{срн}} = n_{\sigma_d}(f_{\sigma} = 0,5). \quad (25.5)$$

Определение максимального коэффициента подпора. При определении величины $n_{\sigma_{x\max}}$ проанализируем результаты расчёта зависимости $n_{\sigma_x}(x)$ путём точного решения уравнения Т.Кармана. На основании данных, приведенных в работе [4, стр. 12-13], можно сделать вывод о том, что при $\alpha < \beta_y$ (здесь $\beta_y = \arctan f$ – угол трения) приемлемо допущение о линейном характере изменения коэффициента подпора n_{σ_x} по длине очага деформации в зонах опережения и отставания (рис. 9).

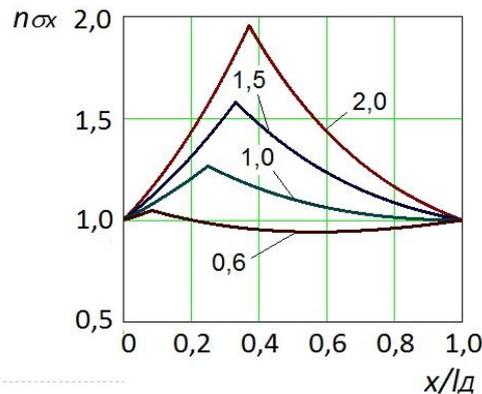


Рис. 9 – Изменение коэффициента подпора $n_{\sigma x}$ по длине очага деформации: $\bar{R} = 25$, $R = 1000$ мм, $\varepsilon = 0,3$, $\bar{L} = 3,22$;

цифры у кривых – отношение $\frac{\beta_y}{\alpha}$

В этом случае справедливо уравнение $n_{\sigma_d}(f) = \frac{1+n_{\sigma_{x \max}}}{2}$, в соответствии с которым значение $n_{\sigma_{x \max}}$ определится из выражения

$$n_{\sigma_{x \max}} = 2n_{\sigma_d}(f) - 1. \quad (26)$$

Учитывая, что $\alpha = \sqrt{\frac{\varepsilon}{2R} \left(2 - \frac{\varepsilon}{2R} \right)}$, уравнение (26)

можно использовать при $\sqrt{\frac{\varepsilon}{2R} \left(2 - \frac{\varepsilon}{2R} \right)} < \beta_y$.

Умножив правую и левую части последнего уравнения на $\frac{2\bar{R}}{2-\varepsilon}$, в соответствии с уравнением (23) получим максимально допустимые значения показателя формы \bar{L} , до которых можно пользоваться формулой (26).

$$\bar{L} < \frac{2\beta_y \bar{R}}{2-\varepsilon}. \quad (27)$$

Подставляя (26) в (25.3), получаем окончательную запись условия определения области достоверных значений коэффициента подпора $n_{\sigma_{срн}}$ = $n_{\sigma_d}(f)$:

$$n_{\sigma_d}(f) < \frac{1+2f}{4f}. \quad (28)$$

Для условий прокатки, при которых $\frac{1+2f}{4f} \leq n_{\sigma_d}(f) \leq \frac{1}{2f}$, на контактной поверхности есть и зона скольжения, и зона прилипания. Обозначим толщину полосы после прокатки, при которой выполняется условие (25.2), как h_{g1} , а

толщину полосы после прокатки, при которой выполняется условие (25.4), как h_{g2} . Логично предположить, что по мере изменения конечной толщины полосы h_1 в пределах между h_{g1} и h_{g2} действительная (истинная) величина коэффициента подпора $n_{\sigma_{срн}}$ изменяется по пропорциональному закону

$$n_{\sigma_{срн}} = \frac{(h_{g2}-h_1)n_{\sigma_d}(f) + (h_1-h_{g1})n_{\sigma_d}(f_{\sigma}=0,5)}{h_{g2}-h_{g1}}. \quad (29)$$

Пример реализации уточнённой методики. На рис. 10 показан пример реализации уточнённой методики при прокатке *относительно тонких полос* ($\bar{L} > 0,75$). Параметры расчёта: $\bar{R} = 25$; $h_0 = 20$ мм; $f = 0,25$. Как следует из приведенных на рис. 10 данных, по мере уменьшения толщины полосы после прокатки от $h_1 = 19,50$ мм до $h_{g1} = 12,89$ мм (по мере увеличения показателя \bar{L} от 0,75 до 3,62) истинная величина коэффициента подпора $n_{\sigma_{срн}}$ совпадает с величиной $n_{\sigma_d}(f)$. При $h_{g1} \leq h_1 \leq h_{g2}$ истинная величина коэффициента подпора $n_{\sigma_{срн}}$ вычисляется по выражению (29) и лежит между значениями $n_{\sigma_d}(f)$ и $n_{\sigma_d}(f_{\sigma} = 0,5)$. При конечной толщине полосы $h_{g2} = 7,79$ мм (значении показателя \bar{L} , равном 5,61) значения $n_{\sigma_d}(f)$ и $n_{\sigma_d}(f_{\sigma} = 0,5)$ равны между собой – зона прилипания распространяется на всю контактную поверхность. При дальнейшем уменьшении конечной толщины полосы (увеличении показателя \bar{L}) истинная величина коэффициента подпора $n_{\sigma_{срн}}$ совпадает с величиной $n_{\sigma_d}(f_{\sigma} = 0,5)$.

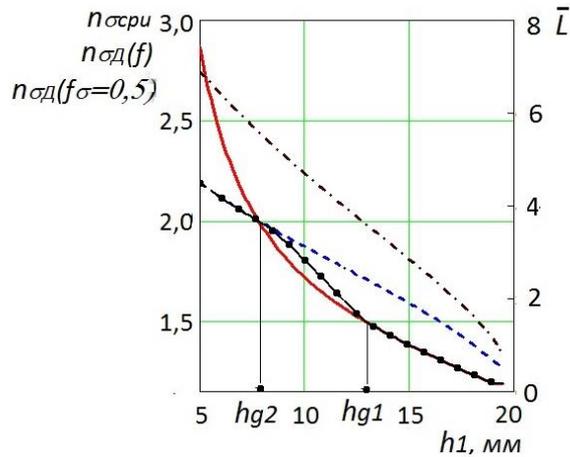


Рис. 10 – Влияние h_1 на: $n_{\sigma_d}(f)$ – сплошная линия; $n_{\sigma_d}(f_{\sigma} = 0,5)$ – штриховая; $n_{\sigma_{ср}}$ – линия с точками; \bar{L} – штрих-пунктир

При реализации уточнённой методики в случае прокатки относительно “высоких” полос ($\bar{L} < 0,75$) необходимо принимать во внимание тот факт, что при некотором “предельном” сочетании параметров прокатки пластическая деформация распространяется не на всю толщину полосы и, вследствие этого, коэффициент подпора достигает своего максимума и не увеличивается с увеличением высоты полосы (уменьшением показателя \bar{L}). А. И. Целиков обосновал положение, в соответствии с которым величина коэффициента подпора $n_{\sigma_{ср}}$ не может превышать значения $n_{\sigma_{max}}$. В качестве $n_{\sigma_{max}}$ А. И. Целиков рекомендует использовать значение $1 + \frac{\pi}{2} = 2,57$ [5, стр. 104], полученное Л. Прандтлем при решении задачи о внедрении пуансона в полупространство в случае отсутствия сдвиговых напряжений на контактной поверхности (т.е. при $f = f_{\sigma} = 0$). В нашем случае при определении коэффициента подпора анализируются условия деформации при $f_{\sigma} = 0,5$. Используя метод

характеристик (линий скольжения), который использовал Л. Прандтль, можно получить систему уравнений, связывающую нормальные (σ_{xk}, σ_{zk}) и касательные напряжения τ_{xzk} на контактной поверхности с показателем трения f_{σ} , решение которой имеет вид:

$$n_x = \frac{\sigma_{xk}}{\sigma^*} = 1 + \frac{\pi}{2} + \arccos(-2f_{\sigma}) - \sin[\arccos(-2f_{\sigma})]; \quad (30.1)$$

$$n_z = \frac{\sigma_{zk}}{\sigma^*} = 1 + \frac{\pi}{2} + \arccos(-2f_{\sigma}) + \sin[\arccos(-2f_{\sigma})]; \quad (30.2)$$

$$n_{xz} = \frac{\tau_{xzk}}{\sigma^*} = f_{\sigma}. \quad (30.3)$$

В соответствии с (30.1-3) при $f_{\sigma} = 0,5$: $n_x = n_z = n_{\sigma_{max}} = \frac{2+3\pi}{4} = 2,856$ и $n_{xz} = 0,5$ (рис. 11). Полученное значение $n_{\sigma_{max}} = 2,856$ использовали при расчёте значений $n_{\sigma_{ср}}$, представленных на рис. 12 при прокатке *высоких* полос (параметры и обозначения те же, что и на рис. 10).

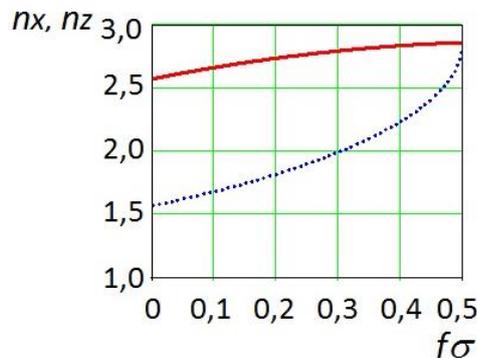


Рис. 11 – Влияние показателя трения f_{σ} на: n_z (сплошная линия); n_x (точки)

Анализируя результаты расчётов, на основании которых построены графики, приведенные на рис. 10 и 12, можно констатировать следующее. По мере увеличения толщины полосы после прокатки от $h_{g1} = 12,89$ мм до $h_{g1} = 19,938$ мм (по мере уменьшения показателя \bar{L} от 3,62 до 0,279) истинная величина коэффициента подпора $n_{\sigma_{срн}}$ совпадает с величиной $n_{\sigma_{д}}(f)$. При $h_{g1} \leq h_1 \leq h_{g2}$ истинная величина

коэффициента подпора $n_{\sigma_{срн}}$ вычисляется по выражению (29) и лежит между значениями $n_{\sigma_{д}}(f)$ и $n_{\sigma_{д}}(f_{\sigma} = 0,5)$. При конечной толщине полосы $h_{g2} = 19,979$ мм (значении показателя \bar{L} , равном 0,163) значения $n_{\sigma_{д}}(f)$ и $n_{\sigma_{д}}(f_{\sigma} = 0,5)$ равны между собой – зона прилипания распространяется на всю контактную поверхность

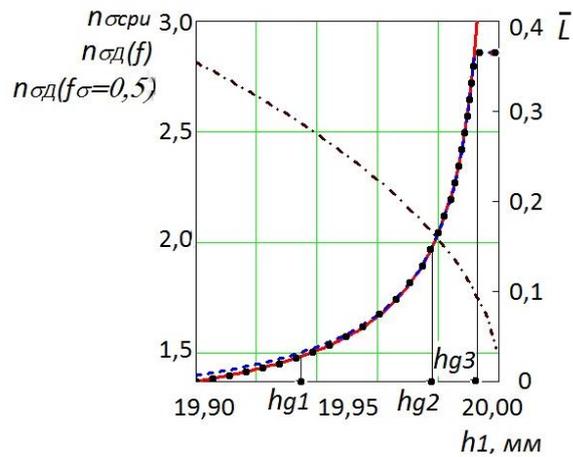
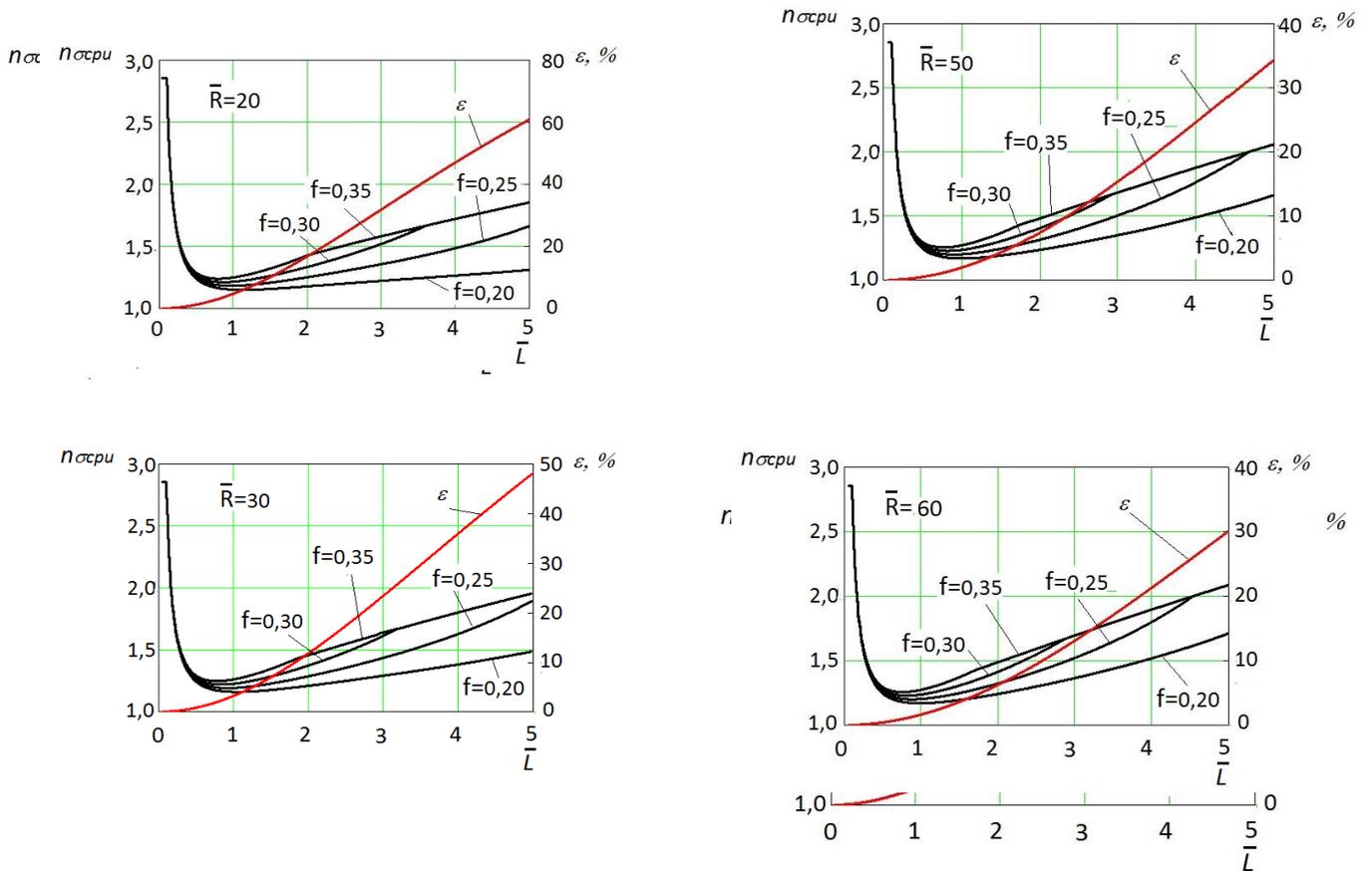


Рис. 12 – Влияние h_1 на: $n_{\sigma_{д}}(f)$ – сплошная линия; $n_{\sigma_{д}}(f_{\sigma} = 0,5)$ – штриховая; $n_{\sigma_{срн}}$ – линия с точками; \bar{L} – штрих-пунктир

При дальнейшем увеличении конечной толщины полосы (уменьшении показателя \bar{L}) истинная величина коэффициента подпора $n_{\sigma_{срн}}$ совпадает с величиной $n_{\sigma_{д}}(f_{\sigma} = 0,5)$ и при $h_1 = h_{g3}$ достигает максимально возможного значения $n_{\sigma_{срн}} = n_{\sigma_{\max}}$. Величина h_{g3} определяется как корень уравнения $n_{\sigma_{д}}(h_0, h_1, R, f_{\sigma} = 0,5) = \frac{2+3\pi}{4}$ и для рассматриваемых параметров прокатки равна $h_{g3} = 19,995$ мм. Дальнейшее увеличение h_1 не приводит к изменению $n_{\sigma_{срн}} = 2,856$.

Графическая интерпретация расчётов истинного коэффициента подпора $n_{\sigma_{срн}}(f, \bar{L}, \bar{R})$. В 1939 году А. И. Целиков вывел известную формулу для расчёта коэффициента подпора при прокатке [8]. Для упрощения ведения расчётов в 1940 году М. А. Лакс построил по этой формуле графики [9], которые в специальной литературе известны как “графики Целикова”. По аналогии с графиками Целикова осуществлена графическая интерпретация результатов расчётов истинного коэффициента подпора $n_{\sigma_{срн}}$ как функции коэффициента трения f и показателей \bar{L} и \bar{R} , которая представлена на рис. 13.

Рис. 13 – Графики для определения истинного коэффициента подпора $n_{\sigma_{ср}}(f, \bar{L}, \bar{R})$ при прокатке**Практическое использование результатов.**

Начиная с 1946 года и до настоящего времени формулу (графики) Целикова применяют в методиках расчётов силовых параметров деформации при поперечно-винтовой [10, стр. 457] и продольной прокатке [11, стр. 114; 12, стр. 79-80] труб на оправке. По аналогии с методиками [10-12 и др.] полученные при использовании предложенного метода расчётные значения коэффициентов подпора $n_{\sigma_{ср}}$ могут быть использованы при анализе процессов прокатки труб на оправке в прошивных станах, риллингах, автоматическом и непрерывном станах. Это было показано при анализе силовых параметров деформации в условиях ТПА “350” и “30-102” ООО “Интертайп Нико Тьюб”. Также значения $n_{\sigma_{ср}}$ (рис. 13) были успешно использованы при расчёте силовых параметров *безоправочной* продольной прокатки труб.

Выводы:

1. Предложена интерпретация метода баланса работ при решении задач теории прокатки, в котором рассматривается баланс работы внутренних сил, оказывающих сопротивление пластическому формоизменению металла, и работ внешних сил, совпадающих с направлениями главных деформаций.

2. При использовании гипотезы о плоской неоднородной деформации и применении предложенного метода учитывается влияние коэффициента трения f , отношения длины очага деформации l_d к средней толщине полосы $h_{ср}$, а также соотношения радиуса валков R и начальной толщины полосы h_0 на среднее контактное давление $p_{ср}$ при прокатке полос во всем возможном диапазоне значений показателей $\bar{L} = \frac{l_d}{h_{ср}}$ и $\bar{R} = \frac{R}{h_0}$.

3. Предложена концепция определения параметров прокатки, при которых закон трения скольжения справедлив: для всей контактной поверхности; для части контактной поверхности; неприменим к условиям контактного взаимодействия.

4. Уточнено предельное значение коэффициента подпора $n_{\sigma_{max}}$ при прокатке высоких

полос ($n_{\sigma_{max}} = \frac{2+3\pi}{4}$ против ранее используемой в

расчётах величины $n_{\sigma_{max}} = 1 + \frac{\pi}{2}$).

5. Представлены результаты расчёта значений истинного коэффициента подпора $n_{\text{сери}}$ как функции f , \bar{L} и \bar{R} .

Список литературы

1. Зильберг Ю. В. Теория обработки металлов давлением: Учебник. – Днепропетровск: Пороги, 2009. – 434 с.
2. Теория пластических деформаций металлов / Е. П. Унксов, У. Джонсон, В. Л. Колмогоров и др.; Под ред. Е. П. Унксова и А. Г. Овчинникова. – М.: Машиностроение, 1983. – 598 с.
3. Чекарчев А. П. Некоторые вопросы теории прокатки. В сб.: Теория прокатки. Материалы конференции по теоретическим вопросам прокатки. – М.: Metallurgizdat, 1962. – С. 31–56.
4. Гуляев Ю. Г., Николаенко Ю. М. Технологічні процеси обробки металів тиском. Частина IV: Навч. посібник. – Дніпропетровськ: НМетАУ, 2014. – 48 с.
5. Целиков А. И., Гришков А. И. Теория прокатки. – М.: Металлургия, 1970. – 358 с.
6. Обработка металлов давлением / Ю. Ф. Шевакин, В. Н. Чернышев, Р. Л. Шаталов, Н. А. Мочалов; Под науч. ред. Ю. Ф. Шевакина – М.: Инетермет Инжиниринг, 2005. – 496 с.
7. Данченко В. Н., Гринкевич В. А., Головкин А. Н. Теория обработки металлов давлением: Учебник. – Днепропетровск: Пороги, 2010. – 386 с.
8. Целиков А. И. Влияние внешнего трения и натяжения на давление металла на валки при прокатке / Metallurg, 1939, № 6. – С. 3–11.
9. Лакс М. А. Расчёт потребной мощности на горячую прокатку для станок с гладкой бочкой / Технический бюллетень МПК “Центроэлектромонтаж”, 1940, № 4–5. – С. 38–52.
10. Целиков А. И. Прокатные станы. – М.: Metallurgizdat, 1946. – 560 с.
11. Обработка металлов давлением: Учебник / Б. А. Романцев, А. В. Гончарук, Н. М. Вавилкин, С. В. Самусев. – М.: Изд. Дом МИСиС, 2008. – 960 с.

12. Орлов Г. А. Основы теории прокатки и волочения труб: Учебное пособие. – Екатеринбург: Изд. Уральского университета, 2016. – 204 с.

References (transliterated)

1. Zil'berg YU. V. Teoriya obrabotki metallov davleniyem: Uchebnik. – Dnepropetrovsk: Porogi, 2009. – 434 p.
2. Teoriya plasticheskikh deformatsiy metallov / Ye. P. Unksov, U. Dzhonson, V. L. Kolmogorov i dr.; Pod red. Ye. P. Unksova i A. G. Ovchinnikova. – Moscow: Mashinostroyeniye, 1983. – 598 p.
3. Chekmarev A. P. Nekotoryye voprosy teorii prokatki. V sb.: Teoriya prokatki. Materialy konferentsii po teoreticheskim voprosam prokatki. – Moscow: Metallurgizdat, 1962. – P. 31–56.
4. Hulyayev YU. H., Nykolayenko YU. M. Tekhnolohichni protsesy obrobky metaliv tyskom. Chastyna IV: Navch. posibnyk. – Dnipropetrovs'k: NMetAU, 2014. – 48 p.
5. Tselikov A. I., Grishkov A. I. Teoriya prokatki. – Moscow: Metallurgiya, 1970. – 358 p.
6. Obrabotka metallov davleniyem / YU. F. Shevakin, V. N. Chernyshev, R. L. Shatalov, N. A. Mochalov; Pod nachn. red. YU. F. Shevakina – Moscow: Internet Inzhiniring, 2005. – 496 p.
7. Danchenko V. N., Grinkevich V. A., Golovko A. N. Teoriya obrabotki metallov davleniyem: Uchebnik. – Dnepropetrovsk: Porogi, 2010. – 386 p.
8. Tselikov A. I. Vliyaniye vneshnego treniya i natyazheniya na davleniye metalla na valki pri prokatke / Metallurg, 1939, No 6. – P. 3–11.
9. Laks M. A. Raschot potrebnoy moshchnosti na goryachuyu prokatku dlya stanov s gladkoy bochkoy / Tekhnicheskii byulleten' MPK “Tsentroelektromontazh”, 1940, No 4–5. – P. 38–52
10. Tselikov A. I. Prokatnyye stany. – Moscow: Metallurgizdat, 1946. – 560 p.
11. Obrabotka metallov davleniyem: Uchebnik / B. A. Romantsev, A. V. Goncharuk, N. M. Vavilkin, S. V. Samusev. – Moscow: Izd. Dom MISiS, 2008. – 960 p.
12. Orlov G. A. Osnovy teorii prokatki i volocheniya trub: Uchebnoye posobiye. – Yekaterinburg: Izd. Ural'skogo universiteta, 2016. – 204 p.

Поступила (received) 15.11.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Інтерпретація метода балансу работ при определении силовых параметров прокатки / Ю. Г. Гуляев, Е. И. Шифрин, Я. В. Фролов, О. А. Ремез // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Х.: «ХПІ», 2017. – № 43 (1265). – С. 72–85 – Бібліогр.: 12 назв. – ISSN 2519-2671

Інтерпретація методу балансу робіт при визначенні силових параметрів прокатки / Ю. Г. Гуляєв, Е. І. Шифрін, Я. В. Фролов, О. А. Ремез // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Х.: «ХПІ», 2017. – № 43 (1265). – С. 72–85 – Бібліогр.: 12 назв. – ISSN 2519-2671

Interpretation of method of balance of work in determining the force parameters of rolling. / Yu. G. Gulyayev, Ye. I. Shifrin, Ya. V. Frolov, O. A. Remez // Bulletin of the NTU «KhPI». Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy. Kh.: NTU «KhPI», 2017. No. 43 (1265). P. 72–85. Bibliogr.: 12. ISSN 2519-2671

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Гуляєв Юрій Геннадійович – доктор технічних наук, професор, ТОВ «ІНТЕРПАЙП НІКО ТЬЮБ», м. Нікополь, Україна, науковий консультант, тел.: (050) 453-03-23, e-mail: gulyaev.y51@gmail.com

Гуляев Юрий Геннадьевич – доктор технических наук, профессор, ООО «Интерпайп Нико Тюб», г. Никополь, Украина, научный консультант, тел.: (050) 453-03-23, e-mail: gulyaev.y51@gmail.com

Gulyayev Yuriy Gennad'yevich – Doctor of Technical Sciences, professor, LLC «Interpipe Niko Tube», Nikopol, Ukraine, Scientific consultant, tel.: (050) 453-03-23, e-mail: gulyaev.y51@gmail.com

Шифрін Євген Ісайович – кандидат технічних наук, ТОВ «Дніпропрес сталь», м. Дніпро, Україна, перший заступник генерального директора, тел.: (050) 821-13-70, e-mail: shifrinei48@gmail.com

Шифрін Евгений Исаевич – кандидат технических наук, ООО «Днепропресс сталь», г. Днепр, Украина, первый заместитель генерального директора, тел.: (050) 821-13-70, e-mail: shifrinei48@gmail.com

Shifrin Yevhen Isayovich – Candidate of Technical Sciences, Dnipropress Steel LLC, Dnipro, Ukraine, First Deputy General Director, tel.: (050) 821-13-70, e-mail: shifrinei48@gmail.com

Фролов Ярослав Вікторович – доктор технічних наук, професор, Національна металургійна академія України, завідуючий кафедрою обробки металів тиском ім. акад. О.П. Чекмарьова, тел.: (067) 631-63-00, e-mail: frolov@metal-forming.org.

Frolov Yaroslav Viktorovich – доктор технических наук, профессор, Национальная металлургическая академия Украины, заведующий кафедрой обработки металлов давлением им. акад. А.П. Чекмарёва, тел.: (067) 631-63-00, e-mail: frolov@metal-forming.org.

Frolov Yaroslav Viktorovich – doctor of technical sciences, professor, National Metallurgical Academy of Ukraine, head of the Metal Forming Department, tel. : (067) 631-63-00, e-mail: frolov@metal-forming.org.

Ремез Олег Анатолійович – кандидат технічних наук, Національна металургійна академія України, доцент кафедри обробки металів тиском ім. акад. О.П. Чекмарьова, тел.: (098) 757-31-82, e-mail: remez@metal-forming.org.

Ремез Олег Анатольевич – кандидат технических наук, Национальная металлургическая академия Украины, доцент кафедры обработки металлов давлением им. А.П. Чекмарёва, тел.: (098) 757-31-82, e-mail: remez@metal-forming.org.

Remez Oleg Anatolevich – Candidate of Technical Sciences, National Metallurgical Academy of Ukraine, associate professor of the Metal Forming Department, tel. : (098) 757-31-82, e-mail: remez@metal-forming.org.

ЗМІСТ

Автухов А.К., Полянский О.С. Методика і методологія проведення досліджень підвищення довговічності прокатних валків з хромонікелевого чавуну.....	5
Алиева Л. И., Картамышев Д. А., Махмудов К. Д. Комбинированное выдавливание-разделение деталей типа колец.....	10
Новиков Ф. В., Полянский В. И., Дитиненко С. А., Крюк А. Г. Концепции высокоточной механической обработки деталей машин.....	18
Плеснецов С.Ю. Методика определения ширины исходной заготовки для специальных гнутых профилей с элементами двойной толщины при проектировании и контроле.....	24
Плеснецов Ю. А., Христиченко Е.Н., Христиченко А.Н. Совершенствование технологии производства профилей с периодически повторяющимися гофрами	30
Пузырь Р.Г., Левченко Р.В., Сирая Ю.Б. Интенсификация процесса раздачи цилиндрической заготовки.....	39
Самсоненко А.А., Прядицький О.А., Кузьміна О.М., Сухомлин С.О. Дослідження процесу прокатки простих профілів в системі приводна-неприводна кліть.....	43
Свидерский В.П., Доровской А.Ф. Оценка и управление риском при внедрении новых технологий.....	50
Середа Б. П., Палехова И. В. Упрочнение валков прокатного стана титановыми покрытиями в условиях СВС.....	54
Смирнов Е. Н., Скляр В. А., Белевитин В. А. Исследование особенностей деформации квадратного подката в овальном калибре при низкотемпературной прокатке.....	59
Тараненко М. Е., Тараненко И. М. Сравнение техпроцессов штамповки тонколистовых трансверсальных элементов.....	64
Устьянов В.Б., Иващенко В.В. Статичне та вібраційне формування ячеїстозаповнених вогнетривів.....	68
Гуляев Ю. Г., Шифрин Е. И., Фролов Я. В., Ремез О. А. Інтерпретація метода балансу робіт при визначенні силових параметрів прокатки.....	72

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

**ВІСНИК
НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО
УНІВЕРСИТЕТУ «ХП»**

Збірник наукових праць

Серія
«Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів
у машинобудуванні та металургії»

Випуск 43 (1265) 2017

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

Технічні редактори: Т.Л. Коворотний, О.С. Курандо

Відповідальний за випуск канд. техн. наук Г.Б. Обухова

АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ: 61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2, НТУ «ХП». каф. обробки металів тиском, тел. (057) 707-60-40, 707-69-16, e-mail: omd.conf@gmail.com, kurando@mail.ru

Обл. вид. № 37-17

Підп. до друку 20.11.2017 р. Формат 60x84 1/8. Папір офсетний. RISO-друк. Гарнітура Таймс. Ум.друк.арк. 8,42. Обл.-вид. арк. 8.6.

Наклад 100 прим. Зам. No 17. 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.