

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І  
НАУКИ УКРАЇНИ**

Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»

**MINISTRY OF EDUCATION  
AND SCIENCE OF UKRAINE**

National Technical University  
"Kharkiv Polytechnic Institute"

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

№ 12 (1337) 2019

Збірник наукових праць

Видання засновано у 1961 році

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

No 12 (1337) 2019

Collected Works

The publication was founded in 1961

Харків  
НТУ «ХПІ», 2019

Kharkiv  
NTU "KhPI", 2019

**Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy: зб. наук. пр. / Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». – Харків : НТУ «ХПІ», 2019. – № 12 (1337) 2019. – 85 с. – ISSN 2519-2671.**

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

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

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

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

Державне видання.

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

Мова статей – українська, російська, англійська.

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

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

Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»

Founder  
National Technical University  
"Kharkiv Polytechnic Institute"

**Головний редактор**

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

**Заст. головного редактора**

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

**Секретар**

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

**Редакційна колегія серії**

*Відповідальний редактор:*

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

*Заступник відповідального редактора:*

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

*Відповідальний секретар:*

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

*Члени редколегії:*

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Німеччина;

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

**Editor-in-chief**

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

**Deputy editor-in-chief**

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

**Secretary**

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

**The editorial board of the series:**

*Editor:*

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

*Deputy managing editor:*

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

*Secretary:*

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

*Members of the Editorial Board:*

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Рекомендовано до друку Вченою радою НТУ «ХПІ».  
Протокол № 9 від 01 листопада 2019 р.

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», 2019

**В. Л. ЧУХЛІБ****РОЗВИТОК НАУКОВОЇ ШКОЛИ ОБРОБКИ МЕТАЛІВ ТИСКОМ  
У НАЦІОНАЛЬНОМУ ТЕХНІЧНОМУ УНІВЕРСИТЕТІ  
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»**

Розвиток наукової школи обробки металів тиском у Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» (НТУ «ХПІ») нерозривно пов'язаний з розвитком кафедри обробки металів тиском та з тими особистостями, які її очолювали в різний час.

Перші згадки про спеціальність «Обробка металів тиском» у Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» пов'язані з самим заснуванням НТУ «ХПІ» у 1885 році, а його професор Петро Матвійович Мухачов, який згодом був ректором НТУ «ХПІ» на протязі 1905–1915 років, почав керувати роботами студентів та щорічно випускати по 2–3 інженера з обробки металів тиском. В той час не існувало кафедр в сучасному розумінні, а були відділення, на яких навчалися студенти. Підготовка фахівців з обробки металів тиском проводилась на механічному відділенні. Вже в перший набір 1885 року було 2 студента з ковальського виробництва, які і склали перший випуск у 1890 році.

Кафедру обробки металів тиском, як самостійний підрозділ, заснував у 1929 році її перший завідуючий Фельдман Ілля Йосипович. Перший етап розвитку наукової школи був пов'язаний з пошуками перспективних напрямків і становленням науково-дослідної роботи на кафедрі. У цей період під його керівництвом виконувалися пошукові роботи в різних напрямках ОМТ: дослідження технологічних процесів кування й штампування, прокатки й пресування, дослідження й удосконалення конструкцій пароповітряних штампувальних молотів, пресів, нагрівальних пристроїв та ін.

З 1959 по 1975 р. кафедру очолював Хмара Самуїл Мойсейович. Він створив при кафедрі потужну галузеву науково-дослідну лабораторію «Твердосплавні штампи», в якій працювало близько 50 штатних наукових та інженерно-технічних

співробітників, сумісників-викладачів і студентів-старшокурсників і став її науковим керівником. В цій лабораторії виконувався повний цикл науково-дослідних і дослідно-конструкторських робіт, виготовлення дослідних зразків твердосплавних штампів, випробування їхньої стійкості й широке впровадження у виробництво. Це дозволило створити нові конструкції високостійких твердосплавних штампів й впровадити їх на виробничих підприємствах, де було зосереджено виробництво інструменту, машинобудівних й електротехнічних виробів.

З 1975 по 1985 р. кафедрою завідував Смолянінов Володимир Порфирійович. Він багато уваги приділяв учбово-методичній роботі й вихованню студентів. Він зробив великий внесок у розробку методик використання аналогових машин у обробці металів тиском.

З 1985 по 2006 р. кафедру очолював Євстратов Віталій Олексійович. Він почав дослідження в новому напрямку «Оптимізація технологічних процесів холодного видавлювання й конструкцій штампів». При кафедрі була створена галузева лабораторія холодного видавлювання, в якій було системно вирішене питання стійкості штампів для холодного видавлювання, створені принципово нові процеси видавлювання і конструкції високостійких штампів для їхнього здійснення. З приходом Євстратова В.О. отримав розвиток новий напрямок – автоматизоване проектування процесів видавлювання й конструкцій високостійких штампів для видавлювання та була створена одна з перших у НТУ «ХПІ» версій САПР штампів для холодного видавлювання. Також він багато уваги приділяв психолого-педагогічним та організаційним засадам підвищення якості підготовки фахівців в технічних закладах вищої освіти.



Рис. 1 – Кафедра обробки металів тиском у 2019 році (зліва направо):

доцент Юрченко Олександр Анатолійович, доцент Губський Сергій Олександрович,  
старший лаборант Єрмоленко Світлана Володимирівна, доцент Окунь Антон Олександрович,  
завідуючий кафедрою Чухліб Віталій Леонідович, професор Кузьменко Віктор Іванович,  
інженер-програміст Кутецький Ярослав Валентинович, учбовий майстер Конев Анатолій Іванович,  
завідуючий лабораторією Босий Віктор Павлович



Рис. 2 – Одна з навчальних аудиторій кафедри обробки металів тиском



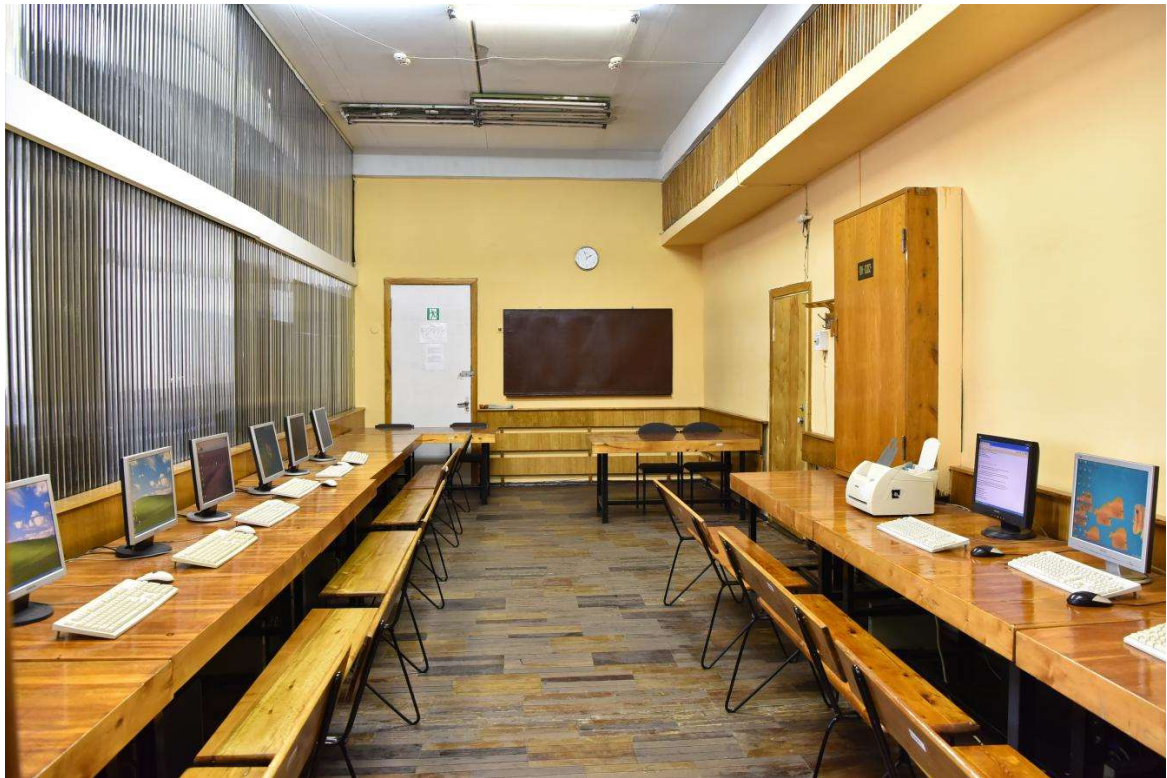


Рис. 3 – Клас комп'ютерного моделювання процесів обробки тиском



Рис. 4 – Лабораторія кафедри обробки металів тиском

З 2006 по 2018 р. кафедру очолював Плеснецов Юрій Олександрович. З його приходом отримала розвиток робота в області пластичної деформації металів, удосконалення та наукового обґрунтування теоретичних аспектів одного з

найважливіших для машинобудівного комплексу технологічних процесів виробництва гнутих профілів. Отримані результати дозволили організувати виробництво принципово нових видів металопродукції зі спеціальними службовими властивостями – профілів

високої твердості, із просічно-витягувальними елементами протиковзання, захисно-декоративними покриттями. Плеснецов Ю.О. виконав багато робіт з проектування обладнання для виготовлення гнутих профілів.

З 2018 року кафедру очолює автор цих рядків. Виконуються наукові роботи з визначення комплексу раціональних параметрів процесу кування з комбінацією операцій осаджування та протягування та варіацією напрямку деформування шляхом теоретичного та експериментального дослідження формозміни металу з вихідною нерівномірністю властивостей, що дає можливість одержання виробів з вуглецевих сталей, спеціальних та титанових сплавів з необхідними властивостями та економією матеріальних витрат. Проведені дослідження кування заготовок дозволили розробити технологічні процеси кування, що забезпечили підвищення якості

одержуваної продукції за рахунок застосування спеціального режиму деформування.

На кафедрі обробки металів тиском з 2009 року проводиться Міжнародна науково-технічна конференція «Ресурсозбереження та енергоефективність процесів та обладнання обробки тиском в машинобудуванні і металургії», яка відбувається кожний рік.

Зараз на кафедрі активно використовуються сучасні інформаційні технології з комп'ютерного моделювання процесів обробки металів тиском. Завдяки плідній співпраці з компанією «Micas Simulation Ltd» (Оксфорд, Великобританія), її директором Бібою Миколою Вікторовичем, кафедрі безкоштовно було надано програмний продукт QFORM, який дозволяє моделювати найрізноманітніші процеси обробки металів тиском.



Рис. 5 – Пам'ятний знак перед головним входом учбового корпусу У1 НТУ «ХПІ», встановлений у 2019 році на честь 90-річчя заснування кафедри обробки тиском

У 2019 році кафедра відзначає ювілей – 90-річчя її заснування, як відокремленого підрозділу в структурі Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» (хоча перший набір студентів-ковалів відбувся ще у рік заснування НТУ «ХПІ» у 1885 році, але в ті роки випуск студентів відбувався без поділу на кафедри). З нагоди цієї події біля головного входу в навчальний корпус У1 (де саме

і знаходиться кафедра) встановлений символічний пам'ятний знак. Він символізує прагнення людини до втілення своєї мрії, про що свідчить напис на ньому «Стань Ковалем Своєї Мрії».

Кафедра пройшла за роки свого існування великий шлях, але все ще попереду і майбутнє в руках абітурієнтів і студентів – ковалів своєї мрії разом з нами – викладачами нашої рідної кафедри!

Надійшла (received) 18.11.2019

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

**Чухліб Віталій Леонідович (Чухлеб Виталий Леонидович, Chukhlib Vitalii Leonidovych)**– доктор технічних наук, завідувач кафедри обробки металів тиском, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», тел.: (095) 792-55-92; e-mail: profdnepro@gmail.com.

УДК 621.774.8

*О. С. АНИЩЕНКО, В. В. КУХАР, А. Г. ПРИСЯЖНИЙ, М. Г. КОРЕНКО, Ю. Г. САГИРОВ***ДОСЛІДЖЕННЯ КОНТУРУ БОКОВОЇ ПОВЕРХНІ  
ПРИ ОСАДЦІ НАДВИСОКИХ ЗАГОТОВОК**

В статті показані етапи формоутворення діжкоподібної бокової поверхні при осадці циліндричних заготовок. Вихідна висота заготовок була в 2-4 рази більше їх вихідного діаметру. Була обумовлена доцільність апроксимації контуру подвійної діжки деформованої заготовки за допомогою суперформули Йохана Геліса. Ця суперформула є універсальним рівнянням, яке може апроксимувати як сферичні, так і параболічні, еліптичні та інші можливі контури поверхні заготовки. Визначені системи розмірних та безрозмірних координат для апроксимуючої функції та умови їх вибору. В статті повідомляється про розробку спеціальної програми для визначення коефіцієнтів апроксимуючої функції за результатами експериментальної осадки заготовок. Представлені графіки розподілу відносного діаметру діжки вздовж висоти заготовок, які були осаджені зі ступенем деформації 0,1, 0,2, 0,3, 0,4 і 0,5. Автори повідомляють, що створення та зникнення подвійної діжки відбувається при ступенях деформації заготовки 0,1...0,3. При збільшенні ступеня деформації від 0,1 до 0,4 максимальний відносний діаметр діжки зміщується від торців до центру заготовки. Різниця між відносними діаметрами подвійної діжки і центру заготовки незначна і складає 0,01...0,04. Для формули, за допомогою якої визначають тиск і зусилля осадки і яка використовує радіус кривизни бокової поверхні замість значень коефіцієнтів тертя, встановлено найбільш прийнятне рівняння для попереднього розрахунку поправочного параметра  $C$ . Радіус кривизни контуру для визначення параметра  $C$  обчислювали за допомогою суперформули.

**Ключові слова:** осадка, стійкість, діжкоутворення, контур, апроксимація, подвійна бочка, радіус кривизни, суперформула.

*А. С. АНИЩЕНКО, В. В. КУХАРЬ, А. Г. ПРИСЯЖНИЙ, М. Г. КОРЕНКО, Ю. Г. САГИРОВ***ИССЛЕДОВАНИЕ КОНТУРА БОКОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ  
ПРИ ОСАДКЕ СВЕРХВЫСОКИХ ЗАГОТОВОК**

В статье показаны этапы формообразования бочкообразной боковой поверхности при осадке цилиндрических заготовок. Начальная высота заготовок была в 2-4 раза больше исходного диаметра. Обусловлена целесообразность аппроксимации контура двойной бочки деформированной заготовки с помощью суперформулы Йохана Гелиса. Эта суперформула является универсальным уравнением, которое может аппроксимировать как сферические, так и параболические, эллипсоидальные и другие возможные контуры боковой поверхности заготовки. Определены системы размерных и безразмерных координат для аппроксимирующей функции и условия их выбора. В статье сообщается о разработке специальной программы для определения коэффициентов аппроксимирующей функции по результатам экспериментальной осадки заготовки. Предоставлены графики распределения относительного диаметра бочки по высоте заготовок, которые были осажены со степенью деформации 0,1, 0,2, 0,3, 0,4 и 0,5. Авторы сообщают, что образование и исчезновение двойной бочки происходит при степени деформации заготовки 0,1...0,3. При увеличении степени деформации от 0,1 до 0,4 максимальный относительный диаметр бочки смещается от торцов к центру заготовки. Разница между относительными диаметрами двойной бочки и центра заготовки незначительна и составляет 0,01...0,04. Для формулы, с помощью которой определяют давление и силы осадки, и которая использует радиус кривизны боковой поверхности вместо значений коэффициентов трения, установлено наиболее приемлемое уравнение для предварительного расчета поправочного параметра  $C$ . Радиус кривизны контура для определения параметра  $C$  вычисляли с помощью суперформулы.

**Ключевые слова:** осадка, устойчивость, бочкообразование, контур, аппроксимация, двойная бочка, радиус кривизны, суперформула.

*O. S. ANISHCHENKO, V. V. KUKHAR, A. H. PRYSYAZHNYI, M. G. KORENKO, Yu. G. SAHIROV***STUDY OF THE CONTOUR OF THE SIDE SURFACE DURING  
THE PRECIPITATION OF ULTRAHIGH BILLET**

The article shows the stages of formation of a barrelled lateral surface during the upsetting of cylindrical billets. The initial height of the blanks is 2-4 times the original diameter. The authors proposed to approximate the contour of the double barrel of the deformed billet with the Johan Gielis superformula. This superformula is a universal formula that can approximate both spherical and parabolic, ellipsoidal, and other possible contours of the side surface of the billet. The authors determined the systems of dimensional and dimensionless coordinates for the approximating function and the conditions for their selection. The article reports on the development of a special program for determining the coefficients of the approximating function according to the results of experimental upsetting of the billet. The authors provided graphs of the distribution of the relative diameter of the barrel along the height of the billet, which were deformed with a degree of deformation of 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 and 0.5. The authors reported that the formation and disappearance of a double barrel occurs when the degrees of deformation of the billet are 0.1...0.3. As the degree of deformation increases from 0.1 to 0.4, the maximum relative diameter of the barrel shifts from the ends to the center of the billet. The difference between it and the relative diameter in the center of the billet is insignificant and is 0.01...0.04. Taking into account the radius of curvature of the contour of the superformula, the authors determined the most accurate formula for calculating the pressure and slump force, which does not contain the values of the friction coefficient.

**Keywords:** upsetting, stability, barrel formation, contour, approximation, double barrel.

**Вступ.** Осадка заготовок є поширеною операцією кування і штампування, призначеної, в першу чергу, для виготовлення поковок з великими поперечними розмірами з заготовок меншого поперечного перерізу, дроблення литої структури злитка, попереднього профілювання заготовки для подальшої прошивки або об'ємного штампування.

Крім того, осадкою отримують текстуру деформації в металі, що деформується, для поліпшення експлуатаційних властивостей деталей, заварюють флокени, видаляють окалину з поверхні і вирівнюють механічні властивості по осі поковок [1]. Одним з обмежень процесу осадки є гранична висота  $H_0$  заготовки/злитка відносно



діаметру  $D_0$ , перевищення якої веде до втрати стійкості обсягу металу, що деформується. У літературі з початку минулого століття і донині [1-3] копіюється співвідношення, що забезпечує стійкість процесу осадки:

$$H_0/D_0 \leq 2,5 \quad (1)$$

Через обмеження (1) часто доводиться використовувати в якості вихідних заготовок ковани поковки замість більш дешевого прокату, тому що останній з розмірами поперечного перерізу більш, ніж 250 мм виготовляється в обмеженому обсязі.

**Аналіз стану питання.** Сучасні технології, обладнання та інструмент вже давно дозволяють осаджувати заготовки за межами нерівності (1). Наприклад, гідропрес моделі PStPÖ1Z-4000 силою 40 МН (м. Кривий Ріг, завод «Констар») забезпечує точне центрування осей заготовки та головного гідроциліндра за рахунок центрального пристрою, розташованого між колонами преса [4, 5]. В результаті при осадці усувається ймовірність поздовжнього вигину для заготовок із співвідношенням  $H_0/D_0 \leq 3,3$ .

Підвищення стійкості надвисоких заготовок досягають в спеціальних штампах, що забезпечують підпір бічної поверхні заготовок, що осаджують [6]. Наявність штампа обмежує абсолютні розміри деформованого металу, але дозволяє значно збільшити довжину деформованої заготовки.

Осадку злитків і прокату із співвідношенням  $H_0/D_0 = 2,0-2,5$  рекомендують проводити між осадочними плитами з увігнутою кульової поверхнею, що центрує вісь деформованого напівфабрикату співвісно осі преса [2].

За кордоном для напівфабрикатів з  $H_0/D_0 > 3$ , що біллетировані, використовують осадку з хвостовиком, що поміщається в отвір нижньої осадочної плити [7].

В літературі вкрай мало досліджень осадки заготовок із співвідношенням  $H_0/D_0 > 2,5$  [8, 9], хоча збільшення граничної величини  $H_0/D_0$ , крім можливого здешевлення вихідного металу, дозволяє поліпшити його фізико-механічні властивості, наприклад, корозійно-втомну міцність [5], збільшити уков. До того ж змінюється контур бокової поверхні заготовки (з'являється «подвійна діжка») і енергосилові параметри осадки. Для розрахунків тиску та зусилля осадки використовують формули двох типів (табл. 1). У вітчизняній літературі прийнято вважати, що зусилля осадки за першим типом формул залежить від площі контакту заготовки з інструментом  $F$  та тиску осадки  $p$ , який, в свою чергу, визначається межею текучості деформованого матеріалу  $\sigma_T$ , помноженою на поправочний коефіцієнт  $C$  (табл. 1, верхня частина), що враховує відношення діаметра до висоти заготовки  $H/D$  і коефіцієнт тертя  $\mu$  між торцями заготовки і осадочними плитами. При

цьому для гарячої осадки коефіцієнт тертя апріорі приймають  $\mu = 0,5$ .

Коефіцієнт  $\mu$  не є постійною величиною в процесі деформації. Методів визначення коефіцієнта тертя існує досить багато [10]. При цьому розкид значень  $\mu$  буває значним для одного і того ж матеріалу з однією і тією ж геометричною формою. Для операцій осадки найчастіше використовують значення коефіцієнта тертя, які визначають методом осадки кільцевих зразків. Він не забезпечує геометричної подоби з процесом осадки циліндричних заготовок, що розглядається, і, отже, ставить під сумнів відповідність отриманих кількісних значень коефіцієнта тертя його реальному значенню при осадці циліндричної заготовки.

Таблиця 1 – Деякі формули для розрахунків коефіцієнта  $C$

Формули, які враховують коефіцієнт тертя і геометричні розміри заготовок	
$C = 1 + \frac{\mu D}{3H}$	(2)
$C = \frac{\mu D_0 \sqrt{H_0}}{3H^{3/2}}$	(3)
$C = \frac{1}{2} \left( \frac{\mu D}{H} \right)^2 \left[ \exp \left( \frac{\mu D}{H} \right) - \left( \frac{\mu D}{H} \right) - 1 \right]$	(4)
$C = \left[ 1 + \frac{\mu D_0}{H_0} \exp \left( \frac{3\varepsilon}{2} \right) \right]^{-1}$	(5)
Формули, які враховують геометричні розміри і радіус кривини діжкоподібного контуру заготовок	
$C = \left[ \left( 1 - \frac{2R}{R_6} \right) \ln \left( 1 - \frac{R_6}{2R} \right) \right]^{-1}$	(6)
$C = \left[ \left( 1 - \frac{2R}{D_6} \right) \ln \left( 1 - \frac{D_6}{2R} \right) \right]^{-1}$	(7)
$C = \left[ \left( 1 - \frac{4R}{D_6} \right) \ln \left( 1 - \frac{D_6}{4R} \right) \right]^{-1}$	(8)
$C = \left[ \frac{(D_6^2 - 4RD_m) \ln \left( 1 - \frac{D_6}{4R} \right)}{D_6^2} \right]^{-1}$	(9)

Поправочний коефіцієнт  $C$  в формулах другого типу (табл.1, нижня частина) не враховує параметр  $\mu$  і залежить від діаметрів бочки  $D_6$ , торців  $D_m$  та контуру бічної поверхні заготовки при осадці, що характеризується радіусом кривини  $R$ :

$$R = \frac{[1 + (y')^2]^{3/2}}{y''}, \quad (10)$$

де  $y'$ ,  $y''$  – перша і друга похідні функції, що апроксимує контур меридіональної твірної бічної поверхні заготовки, що осаджена.

Найчастіше апроксимуючі функції визначають за значеннями  $H$ ,  $D_6$  і  $D_m$ .

Таблиця 2 – Деякі формули апроксимації поверхні діжкоподібної заготовки після осадки

Формула	Позначення
парабола $y = \frac{2(D_m - D_6)}{H^2} x^2 + \frac{D_6}{2}$	$D_6, D_m, H$ – діаметри діжки, торця і висота заготовки
еліпс $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$	$a = \frac{H}{2\sqrt{1 - \left(\frac{D_m}{D_6}\right)^2}}, b = \frac{D_6}{2}$
коло $x^2 + (y - b)^2 = R_{\text{кола}}^2$	$b = \frac{D_6^2 - D_m^2 - H^2}{4(D_6 - D_m)} R_{\text{кола}} = \frac{(D_6 - D_m)^2 + H^2}{4(D_6 - D_m)}$
косинус $y = a \cos(bx)$	$a = \frac{D_6}{2} b = \frac{2}{H} \arccos\left(\frac{D_m}{D_6}\right)$
косинус гіперболічний $y = a \cosh(bx)$	$a = \frac{D_m}{2} b = \frac{2}{H} \operatorname{arccos}\left(\frac{D_6}{D_m}\right)$

Ці параметри, отримані прямими вимірами, замість величини  $\mu$ , розрахованої по результатах непрямих вимірювань без повного дотримання масштабного відповідності та геометричної подоби, в принципі дозволяють зменшити похибки в розрахунках зусилля осадки. Однак при розрахунках радіуса кривини  $R$  необхідно знати точний вид функції, що апроксимує контур бічної поверхні діжки. Невеликі неточності у виборі функції можуть привести до великих відхилень значення  $R$ , оскільки в рівняння (10) входять перша і друга похідні апроксимуючої функції.

На сьогодні дослідники наперед інтуїтивно припускають той або інший вид контуру бічної поверхні заготовки, що осаджена, а отже і вид апроксимуючої функції (табл. 2), а потім підбирають відповідні значення коефіцієнтів, що входять в цю функцію. Тобто для осадки заготовок поки не існує функції універсального виду, яка в змозі описати будь-який з можливих контурів бокової поверхні деформованих заготовок (зокрема, контур «подвійної діжки»).

Мета роботи – вивчення процесу осадки надвисоких заготовок і виявлення універсальної формули апроксимації діжкоподібних контурів заготовок, що осаджені.

Основна частина. Дослідження проводили на свинцевих заготовках діаметром  $D_0 = 30$  мм з відносною висотою  $H_0/D_0 = 2 - 4$ . Осадку проводили без мастила між плоскими осадочними плитами зі швидкістю деформування 2 мм/с. Коефіцієнт тертя між зразком та плити за методом Губкіна складав  $\mu = 0,41$ . Ступінь деформації визначали за формулою:

$$\varepsilon = (H_0 - H)/H_0 \quad (11)$$

На боковій поверхні заготовок на відстані вздовж висоти, що дорівнює 0,1 від вихідної висоти  $H_0$ , виконували кільцеві риски. Викривлення контуру бокової поверхні при осадці вивчали за результатами змінення діаметру цих рисок при поетапній осадці заготовок зі ступенями деформації 0,1 – 0,5 з кроком 0,1.

В літературі [11, 12] є відомості про те, що величезна кількість різних контурів, в тому числі і діжкоподібні контури досить точно описуються суперформулою Йохана Геліса (J. Gielis). У полярних координатах для радіус-вектора  $r$  і кута  $\varphi$  суперформула Геліса має вигляд:

$$r = \frac{1}{\sqrt{\left[\left(\frac{1}{a} \cos\left(\frac{k}{4}\varphi\right)\right)\right]^{n_1} + \left[\left(\frac{1}{b} \sin\left(\frac{k}{4}\varphi\right)\right)\right]^{n_2}}} \quad (12)$$

де  $n_1, n_2, n_3$  – параметри, що визначають форму кривої;

$a, b$  – габарити (величини напівосей);

$k$  – коефіцієнт, який характеризує число фрагментів, що повторюються.

Попередні спроби апроксимації суперформулою показали, що важливе значення для можливості і точності апроксимації має вибір системи координат.

На рис. 1 представлена схема вибору системи координат апроксимуючої функції щодо геометричних розмірів деформованої діжкоподібної заготовки. Відповідно до цієї схеми апроксимацію експериментальних даних можна проводити в системі розмірних і безрозмірних координат.

Якщо контур бокової поверхні осаджених заготовок являє собою одинарну діжку, то вибирається система безрозмірних координат  $y\theta x$  з межами вимірювань по обох осях від нуля до одиниці. Ось  $x$  паралельна осі заготовки і збігається з твірною, котра утворює циліндр з діаметром, рівним діаметру торця  $D_m$ . Ось  $y$  перетинає вісь  $x$  у площині максимального діаметра діжки заготовки  $D_6$ .

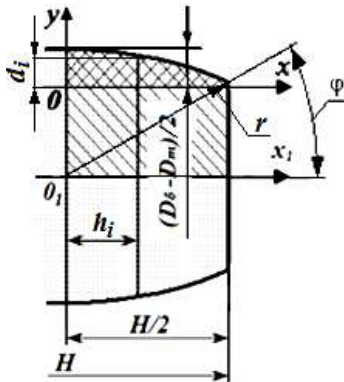


Рис.1 – Схема щодо вибору системи координат апроксимуючої функції

Безрозмірність координат  $X_i$  та  $Y_i$  забезпечували діленням відповідно виміряного реального розміру  $h_i$  (мм) на максимально можливий розмір, який дорівнює половині висоти осадженої заготовки  $H/2$ , тобто  $[X_i = h_i/(H/2)]$ , а також виміряного реального розміру

$$d_i = (D_6^i - D_m)/2, \quad (13)$$

при  $x = h_i$  на максимально можливий розмір, який дорівнює напіврізниці діаметрів діжки і торця заготовки, тобто

$$Y_i = \frac{(D_6^i - D_m)/2}{(D_6^{\max} - D_m)/2} \quad (14)$$

У цій системі координат ( $y\theta x$ ) контур одинарної діжки описується радіус-вектором  $r$  суперформули при змінній кута  $\varphi$  в межах  $[0; 90^\circ]$ .

Якщо контур бокової поверхні заготовок при осадці еволюціонує від подвійної до одинарної діжки, вибирається система координат  $y\theta x_i$ , в якій вісь  $x_i$  збігається з центральною віссю заготовки, а безрозмірність координати  $Y_i$  забезпечується поділом виміряного реального розміру радіуса діжки вздовж вісі заготовки на максимально можливий, тобто

$$Y_i = \frac{D_6^i/2}{D_6^{\max}/2} = D_6^i/D_6^{\max} \quad (15)$$

Для апроксимації експериментально визначених точок бокової поверхні осаджених заготовок використовували спеціальну програму розрахунку коефіцієнтів, що входять в суперформулу. Інтерфейс цієї програми представлений на рис. 2.

Оскільки суперформула не перетворюється до лінійного вигляду, апроксимація за методом

найменших квадратів неможлива, тому коефіцієнти визначали методом перебору можливих варіантів з заданим кроком і отриманий розрахунковий результат порівнювали з експериментально отриманим. За шуканий брали той коефіцієнт, який забезпечував мінімальну різницю вищезазначених результатів.

Програма дозволяє: віртуально генерувати будь-яку кількість «експериментальних» точок з заданим розкидом значень; додавати, видаляти або змінювати в таблиці експериментально встановлені координати точок контуру заготовок; задавати значення коефіцієнта  $k$  в суперформулі, хоча його значення за замовчуванням має дорівнювати  $k = 4$  [11]; розраховувати коефіцієнти  $n_1, n_2, n_3$ , суперформули із заданим кроком перебору варіантів; фіксувати в нижньому вікні вид шуканої апроксимуючої функції.

На рис. 3 надані результати збільшення діаметру кільцевих рисок  $D$  відносно вихідного діаметру  $D_0$  в залежності від висоти заготовок  $H$ , що зменшується при осадці. Розташування кільцевих рисок вимірювали параметром  $f$  – відстанню від нижнього торця до кільцевої риски, зокрема,  $f/H = 0,5$  для риски, що ділить навпіл висоту зразка  $H$ .

Рисунки 3 б-г вказують на те, що подвійне діжкуотворення виникає, якщо осаджують заготовки зі співвідношенням  $H_0/D_0 > 2$ . Крім того, подвійна діжка фіксується при ступенях деформації зразків не більше ніж 0,3.

При  $H_0/D_0 = 2$  осадка заготовок збільшує максимальний діаметр діжки  $D$  (при  $f/H = 0,5$ ) в 1,05 – 1,47 рази при  $\varepsilon = 0,1 \dots 0,5$ . Збільшення відносної висоти до  $H_0/D_0 = 2,5$  збільшує максимальний діаметр діжки до  $D/D_0 = 1,49$ . Крім цього, в інтервалі ступенів деформації  $\varepsilon = 0,1 - 0,3$  виникає подвійна діжка на боковій поверхні заготовок.

Зі зростанням  $\varepsilon$  від 0,1 до 0,4 максимальний відносний діаметр діжки зміщується в напрямі від торців до центру заготовок та фіксується при  $f/H = 0,78, 0,77, 0,73$  і 0,68 відповідно для заготовок з  $H_0/D_0 = 2, 2,5, 3, 3,5$ .

Подвійна діжка для заготовок з  $H_0/D_0 = 3$ , що осаджуються, вже майже непомітна при  $\varepsilon \geq 0,3$ . Максимальний відносний діаметр діжки фіксується в інтервалі  $f/H = 0,76 - 0,74$ , а максимальна різниця  $\Delta(D/D_0) = 0,02$  при  $\varepsilon = 0,2$ . Помітно, що кільцеві зони, які віддалені від торця на відстань 0,1H зі зростанням  $\varepsilon$  становляться торцевою поверхнею заготовок. Так, якщо графіки 1–4 мають 5 експериментальних замірів діаметрів  $D$ , то графік 5 – тільки чотири заміри.

Збільшення відносної висоти заготовок до  $H_0/D_0 = 3,5$  (рис. 3 г) за показниками  $D/D_0$  при осадці майже не відрізняється від графіків (рис. 3 в) для осадки заготовок з  $H_0/D_0 = 3$ . Зокрема, подвійна діжка фіксується в інтервалі ступенів деформації  $\varepsilon = 0,1 - 0,3$  і за параметром  $\Delta(D/D_0)$  також досить незначна.

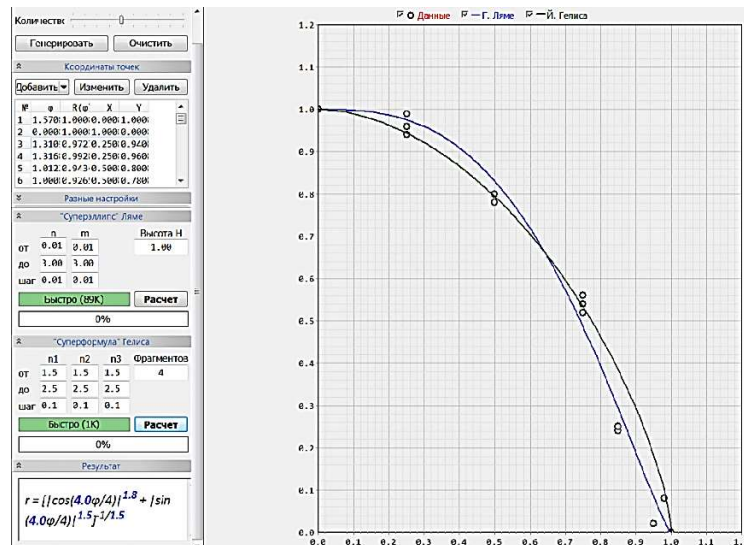
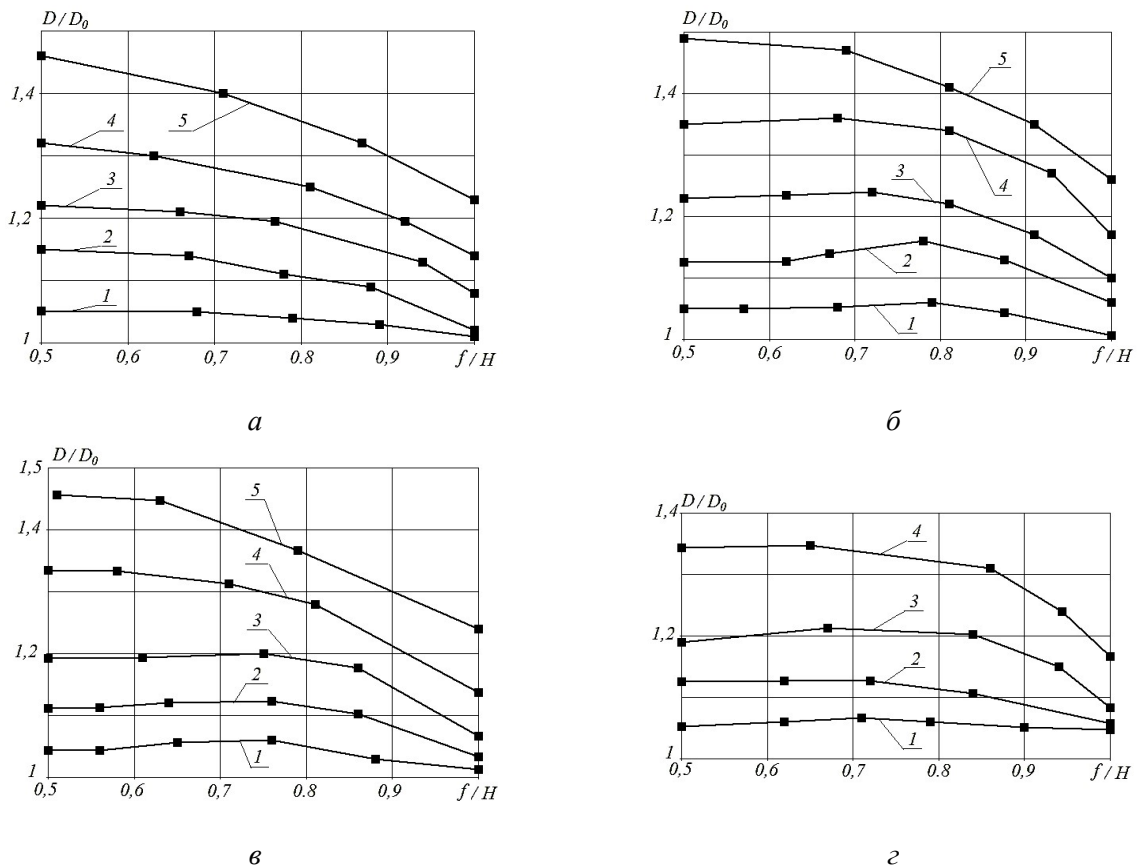


Рис. 2 – Інтерфейс програми розрахунку коефіцієнтів суперформули

Рис. 3 – Розподіл відносного діаметру діжки вздовж висоти заготовок, що осаджені: 1...5 –  $\varepsilon = 0,1 \dots 0,5$  з кроком 0,1; а –  $H_0/D_0 = 2$ , б –  $H_0/D_0 = 2,5$ ; в –  $H_0/D_0 = 3$ , г –  $H_0/D_0 = 3,5$ 

Що стосується осадки заготовок з  $H_0/D_0 = 4$ , то вже при  $\varepsilon = 0,08$  вони втрачали стійкість і вигиналися так, що подальша їх деформація була неможливою.

Суперформула, що апроксимує контур з подвійною діжкою в координатах  $y\theta, x_I$ , відтворює такий же контур замість прямої лінії на торцевій поверхні заготовки. Оскільки торець плоский, то

апроксимовані значення коефіцієнтів суперформули при змінній кута  $\varphi$  від 0 до  $\arctg[(D_m/2)/(H/2)]$  не дійсні, а розрахунок контуру подвійної діжки слід проводити при змінній кута  $\varphi$  в межах  $\{\arctg[(D_m/2)/(H/2)]; \pi/2\}$ .

На рис. 4 показані графіки апроксимуючої суперформули Йохана Геліса для осадки заготовок з відносною висотою  $H_0/D_0 = 3,5$ .



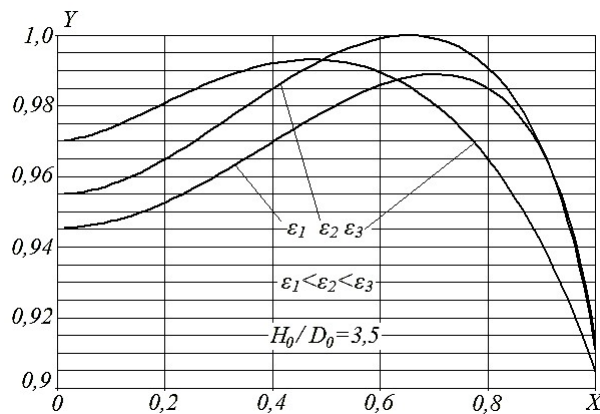


Рис. 4. Апроксимація контуру подвійної діжки на боковій поверхні заготовок з  $H_0/D_0 = 3,5$ , що осаджені:  $\varepsilon_1 = 0,1$ ;  $\varepsilon_2 = 0,2$ ,  $\varepsilon_3 = 0,3$ .

Таблиця 3 – Значення коефіцієнтів суперформули

Відносна висота заготовок, що осаджені, $H_0/D_0$	Ступінь деформації заготовки, $\varepsilon$	Значення коефіцієнтів суперформули		
		$n_1$	$n_2$	$n_3$
2	0,1	1,4 (0,7)	13,5 (2,1)	1,3 (1,6)
	0,2	33 (2,1)	34 (2,1)	25,4 (1,4)
	0,3	2,1 (8,9)	12,3 (0,5)	1,6 (0,7)
	0,4	1,6 (2,2)	15,4 (1,2)	1,1 (1,0)
	0,5	6,1 (1,2)	66,2 (1,4)	3,7 (1,2)
2,5	0,1	2,7	10	2,6
	0,2	2,2	13,8	2
	0,3	1,8	8,1	1,7
	0,4	1,8	7,5	1,7
	0,5	2,3	11,8	1,6
3	0,1	7,9	11,9	7,8
	0,2	8	10,5	7,9
	0,3	3,1	7,5	3
	0,4	7,6	11,4	5,8
	0,5	3,4	15,9	2,2
3,5	0,1	3,7	19,9	3,5
	0,2	1,5	10,7	1,4
	0,3	3,4	7,3	3,4
	0,4	2,4	7,6	2,2
	0,5	3,3	11,5	2,3

Графіки показують максимум діжкоутворення при  $\varepsilon_2 = 0,2$ , після чого починає інтенсивніше зростати діаметр центральної частини заготовки, і подвійна діжка поступово перетворюється в одинарну. Для інших значень відносної висоти заготовок та ступенів деформації графіки приблизно такі ж самі, тобто накладаються один на одного, тому не показані. хоча змінення значень  $k$  в інтервалі [3; 5], як показали наші розрахунки, забезпечувало інші значення коефіцієнтів  $n_1 \dots n_3$ , також придатні до використання.

Коефіцієнти  $n_1 \dots n_3$  суперформули були використані для визначення параметрів  $C$  згідно з формулами (6-9), а також їх порівняння з такими ж параметрами в формулах (2-3). В результаті

В таблиці 3 надані значення коефіцієнтів суперформули, які були отримані при апроксимації твірних бокових поверхонь заготовок, що осаджені, у тому числі з одинарною та подвійною діжкою. При розрахунках були витримані рекомендації Йохана Геліса [11] призначати (для випадків, що схожі на наш) значення коефіцієнта  $k = 4$ , виявили, що формула (2) збігається з формулами (8-9), якщо  $\mu = 0,25$  і  $0,43$ , а формула (3) – якщо  $\mu = 0,20$  і  $0,34$ . Отже формула (9) непридатна для визначення  $C$ , оскільки значення  $\mu = 0,34, 0,43$ , як і  $\mu = 0,41$  (метод Губкіна), завищені. Вірогідно, найбільш придатні для розрахунків тиску та зусилля осадки формули (2) і (8). Значення апроксимуючих коефіцієнтів  $n_1 \dots n_3$  в лапках,

наведені в табл. 3 для зразків з відносною висотою  $H_0/D_0 = 2$ , тобто осаджених без подвійної діжки, отримані для того випадка, коли були вибрані координати  $u\theta_x$ , а ординату  $Y_i$  розраховували за формулою (14).

**Висновки/** Запропонована універсальна суперформула Йохана Геліса, яка апроксимує всі можливі контури бокової поверхні заготовок, що осаджені, зокрема, одинарну та подвійну діжку. Встановлено найбільш прийнятне рівняння для обчислення поправочного параметра  $C$  в формулі для визначення тиску та зусилля осадки, яка використовує радіус кривини бокової поверхні заготовки.

#### Список літератури

1. Матвеев А. С. Кочетков В. А. *Справочник кузнеца*. Москва: Машиностроение, 2011. – 360 с.
2. Семенов В. И. *Ковка и горячая штамповка: Учебник*. Москва: МГИУ, 2011. – 414 с.
3. Соколов Л. М., Аліев І. С., Марков О. С., Алієва Л. І. *Технологія кування*. Краматорськ: ДДМА, 2010. – 300 с.
4. Анищенко А. С., Каргин С. Б. Совершенствование технологии раскатки кольцевых титановых поковок /А.С. Анищенко. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*, Зб. наук. пр. Харків: ХПІ, 2011. №46. – С. 14–18.
5. Анищенко А.С., Кухарь В. В., Присяжний А.Г. Разработка технологии кольцераскатки титановых поковок с повышенной коррозионно-усталостной прочностью. *Обработка металлов давлением. Сб. науч. тр. ДГМА*. Краматорск: ДГМА. 2015. №2 (41). – С.272-277.
6. Попов А. В., Хван А. Д. Штамп для осадки длинномерной цилиндрической заготовки. *Обработка металлов давлением. Сб. науч. тр. ДГМА*. Краматорск: ДГМА. 2010. №1 (22). – С. 262–265.
7. Faszinierende Großtechnik <https://www.youtube.com/watch?v=mnx8GAXF3Ow>.
8. Тарновский И.Я. [и др.]. Теория обработки металлов давлением. Москва: Металлургиздат, 1963. 672 с.
9. Антошечков Ю. М., Таупек И. М. Исследование процесса осесимметричной осадки методами компьютерного моделирования. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2015. – т. 58, №1. – С.49–52.
10. Зинovieв А. В., Чумаков Ю. П. Теория обработки металлов давлением. Москва: МИСиС, 1983. – 81 с.
11. Gielis J. A. Generic Geometric Transformation that unifies a

Wide Range of Natural and Abstract Shapes. *American Journal of Botany*. 2003. No 90(3). P. 333–338.

12. Анищенко А. С., Кухарь В. В., Мкртчян Е. А. Аппроксимация формулами Ляме-Геліса контура оболочек при сверхпластической формовке листовых заготовок. *Вісник ЦДТУ: зб. наук. пр. Серія «Технічні науки»*. Маріуполь: ЦДТУ. 2017. Вип. 34. – С. 7-17.

#### References (transliterated)

1. Matveev A.S., Kochetkov V.A. *Spravochnik kuzneta [Handbook for the blacksmith]*. Moscow: Mashinostroenie. 2011. – 360 p.
2. Semenov V.I. *Kovka i goryachaya shtampovka: Uchebnik [Forging and hot stamping: Textbook]*. Moscow: MGIU, 2011. – 414 p.
3. Sokolov L. M. Aliev I. S., Markov O. E., Alieva L. I. *Tekhnologia kuvannya [Forging technology]*. Kramators'k: DDMA, 2010. – 300 p.
4. Anishchenko A. S., Kargin S. B. Sovershenstvovanie tekhnologii raskatki koltsevikh titanovikh pokovok s povyshennoi korrozionno-ustalostnoi prochnosti. *Obrabotka metallov davleniem. Sb. nauch. tr. DGMA*. Kramators'k: DGMA, 2015. No (41). – P. 272–277.
5. Anishchenko A. S., Kukhar V. V., Prisiaznyi A. G. Razrabotka tekhnologii kol'tseraskatki titanovikh pokovok s povyshennoi korrozionno-ustalostnoi prochnosti. *Obrabotka metallov davleniem. Sb. nauch. tr. DGMA*. Kramators'k: DGMA, 2015. No (41). – P. 272–277.
6. Popov A. V., Hvan A.D. Shtamp dlia osadki dlinnomernoi tsilindricheskoi zagotovki. *Obrabotka metallov davleniem. Sb. nauch. tr. DGMA*. Kramators'k: DGMA, 2010. No (22). – P. 262–265.
7. Faszinierende Großtechnik <https://www.youtube.com/watch?v=mnx8GAXF3Ow>.
8. Tarnovskiy I. Ya. [i dr.] *Teoria obrabotki metallov davleniem [Metal forming theory]*. Moscow: Metallurgizdat, 1963. – 672 p.
9. Antoshchenkov Iu. M., Taupek I. M. Issledovanie protsessa osesimmetrichnoi osadki metodami kompiuternogo modelirovaniia. *Izvestia vuzov. Chernaia metallurgia*, 2015. Vol. 58, No 1. – P. 49–52.
10. Zinoviev A. V., Chumakov Yu. P. *Teorya obrabotky metallov davleniem [Metal forming theory]* – Moscow: MISiS. 1983. – 81 p/
11. Gielis J. A. Generic Geometric Transformation that unifies a Wide Range of Natural and Abstract Shapes. *American Journal of Botany*. 2003. No 90(3). – P. 333–338.
12. Anishchenko A. S., Kukhar V. V., Mkrтчян E. A. Aproximatsiya formulamy Lame-Gelisa kontura obolochek pri sverkhplasticheskoy formovke listovykh zagotovok. *Visnyk PDTU: zb. nauk. prarts. Serya "Tkhnichny nauky"*. Mariopol: PDTU, 2017. Vyp.34. – P. 7–17.

Надійшла (received) 15.06.2019

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

**Анищенко Олександр Сергійович (Анищенко Александр Сергеевич, Anishchenko Oleksandr Serhiiovych)** – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Державний вищий науковий заклад «Приазовський державний технічний університет», доцент кафедри обробки металів тиском, Маріуполь, Україна, ORCID <https://orcid.org/0000-0002-1350-836X>, e-mail: [aa540628@gmail.com](mailto:aa540628@gmail.com)

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

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

**Коренко Марина Георгіївна (Коренко Марина Георгиевна, Korenko Marina Georgievna)** – кандидат технічних наук, доцент, Криворізький металургійний інститут Національної металургійної академії України, доцент кафедри металургійних технологій, Кривий Ріг, Україна, ORCID <https://orcid.org/0000-0002-2931-4076>, e-mail: [marinak2010@bk.ua](mailto:marinak2010@bk.ua)

**Сагіров Юрій Георгійович (Сагиров Юрий Георгиевич, Sahirov Yurii Georhiiovych)** – кандидат технічних наук, доцент, Державний вищий науковий заклад «Приазовський державний технічний університет», доцент кафедри підйомно-транспортних машин і деталей машин, Маріуполь, Україна, ORCID <https://orcid.org/0000-0002-8854-0639>, e-mail: [sagirov1978@ukr.net](mailto:sagirov1978@ukr.net)

УДК 621.965.02

**П. В. БОРОВИК****ЗАДАЧА ОПТИМІЗАЦІЇ ПРОФІЛЮВАННЯ ФАСОННОГО НОЖА**

Проаналізовано переваги та недоліки процесу гарячого поділу безперервнолітої квадратної заготовки на ножицях з фасонними ножами. Відзначається доцільність проведення теоретичних досліджень розділових операцій на ножицях з використанням методу скінченних елементів (МСЕ). Метою даної роботи було визначення оптимальної форми профілювання фасонного ножа для поділу квадратної заготовки в гарячому стані шляхом математичного моделювання на базі МСЕ. Представлено методику проведення досліджень, що включали два етапи. На першому етапі використовували математичне моделювання відповідно до плану повного факторного експерименту 24 згідно виробничих умов реалізації процесу з ножами що мали значення кута розкриття ножів  $90...98^\circ$  та ухилу контактних поверхонь  $3...11^\circ$ . При обробці даних моделювання були отримані три відносних параметра, два з яких характеризують змінання (затяжка) і загин кінців розкату, і ще один – ромбічність торцевої поверхні. Для кожного з параметрів, отримані лінійні рівняння регресії як функція температури різання та розмірів заготовок, величини кута розкриття ножів та ухилу контактних поверхонь. На другому етапі дослідження вирішували оптимізаційну задачу пошуку мінімуму цільової функції – ромбічності. За результатами відзначено, що оптимальні значення профілювання ножів залежать від вимог, що висуваються до якості зрізу. Введено фактор граничного відхилення змінання і загину кінців, встановлений діапазон його значень та проаналізовано вплив на оптимальні параметри. Запропоновано величини кута розкриття ножів та ухилу контактних поверхонь, за умови мінімізації граничного відхилення змінання і загину кінців у досліджуваних діапазонах температур та розмірів заготовок. Отримано залежності параметрів профілювання ножів від граничного відхилення змінання і загину кінців заготовок після поділу. Результати роботи можуть бути рекомендовані для використання при прийнятті проектно-конструкторських і технологічних рішень в питаннях гарячого розділення безперервнолітої квадратної заготовки фасонними ножами на кут.

Ключові слова: фасонний ніж, якість поділу квадратної заготовки, ножиці, математична модель.

**П. В. БОРОВИК****ЗАДАЧА ОПТИМІЗАЦІЇ ПРОФІЛІРОВКИ ФАСОННОГО НОЖА**

Проаналізовані переваги та недоліки процесу гарячого розділення неперервнолітої квадратної заготовки на ножицях з фасонними ножами. Отзначається цілесобразність проведення теоретичних досліджень розділових операцій на ножицях з використанням методу скінченних елементів (МКЭ). Целью данной работы было определение оптимальной формы профилировки фасонного ножа для разделения квадратной заготовки в горячем состоянии путем математического моделирования на базе МКЭ. Представлена методика проведения исследований, состоящих из двух этапов. На первом этапе использовали математическое моделирование в соответствии с планом полного факторного эксперимента 24 согласно производственных условий реализации процесса ножами, имевшими угол раскрытия ножей  $90...98^\circ$  и наклон контактных поверхностей  $3...11^\circ$ . При обработке результатов моделирования были получены три относительных параметра, два из которых характеризуют смятие (затяжка) и загиб концов раската, и еще один – ромбичность торцевой поверхности. Для каждого из параметров, полученные линейные уравнения регрессии как функция температуры резки и размеров заготовок, величины угла раскрытия ножей и уклона контактных поверхностей. На втором этапе исследования решали оптимизационную задачу поиска минимума целевой функции – ромбичности. По результатам отмечено, что оптимальные значения профилирования ножей зависят от требований, предъявляемых к качеству среза. Введен фактор предельного отклонения смятия и изгиба концов, установлен диапазон его значений и проанализировано влияние на оптимальные параметры. Предложены величины угла раскрытия ножей и уклона контактных поверхностей, при условии минимизации предельного отклонения смятия и изгиба концов в исследуемых диапазонах температур и размеров заготовок. Получены зависимости оптимальных параметров профилировки ножей от предельного отклонения смятия и изгиба концов заготовок после разделения. Результаты работы могут быть рекомендованы для использования при принятии проектно-конструкторских и технологических решений в вопросах горячего разделения неперервнолітої квадратної заготовки фасонними ножами на угол.

Ключевые слова: фасонный нож, качество разделения квадратной заготовки, ножицы, математическая модель.

**P. V. BOROVIK****THE OPTIMIZATION PROBLEM OF THE SHAPED KNIFE PROFILING**

The advantages and disadvantages of the process of separation in hot condition of billet with square shape by special profiled knives were analyzed. There is expediency of carrying out theoretical researches the separating operations by shears based on finite elements method (FEM) is noted. The purpose of the work was to determine the optimal shape for make form a profiled knife for separating a square billet in a hot state by simulating based on the FEM. A methodology of study realization consisting of two stages is presented. At the first stage, simulating was used in accordance with the plan of the full factorial experiment 24 according to the technological environment for the process implementation with knives having a knife opening angle of  $90...98^\circ$  and a contact surface inclination of  $3...11^\circ$ . At the processing the simulation results, three relative parameters were obtained. Two parameters characterize the crumpling (tightening) and bending of the billet ends, and one more – the rhomboidity of the end surface. For each of the parameters, the linear regression equations obtained as a function of cutting temperature and billet sizes, the knife opening angle and contact surface inclination. At the second stage of the study, the optimization problem of determining the minimum of the objective function – rhomboidity – was solved. According to the results, it was noted that the optimal values of the profiling of knives depend on the requirements for the quality of the cut. The factor of the maximum deviation of crumpling and bending of the ends is introduced. The range of its values is established and the influence on the optimal parameters is analyzed. The values of the knife opening angle and contact surface inclination are proposed, provided that the maximum deviation of the crumpling and bending of the ends, at the studied temperature ranges and sizes of the billets, is minimized. The dependences of the optimal parameters of the profiling of knives on the maximum deviation of the crumpling and bending of the ends of the billets after separation are obtained. Results of work can be recommended for use to get solutions in design and technology questions of hot separation square billet by profiled knife on the angle.

Keywords: profiled knives, the quality of the separation of a square billet, shears, a mathematical model

**Вступ.** Процеси поділу металопрокату на мірні довжини є невід'ємною складовою технологій виробництва прокатної продукції, а також в умовах виготовлення безперервнолитих заготовок. Для реалізації процесу поділу досить широко використовують ножиці різноманітних конструкцій [1, 2]. Як відомо з практики, розділові операції, здатні робити істотний вплив не тільки на якість готового металопрокату, а й на ефективність реалізації наступних технологічних операцій. На сучасному етапі розвитку металургійного машинобудування ефективно вирішення такого типу задач можливе за умови підвищення точності вироблених конструкторських розрахунків і збільшення ступеня наукової обґрунтованості при прийнятті проектно-конструкторських і технологічних рішень.

**Аналіз стану питання.** У практиці виробництва сортового металопрокату та безперервнолитих заготовок до нього застосовують операції поперечного поділу, зокрема на ножицях [1, 2]. При цьому підвищення вимог до якості готової продукції і прагнення розширити технологічні можливості ножиць сприяють підвищенню інтересу в даній області [3, 4].

До основних переваг процесу поділу металу на ножицях слід віднести: безвідходність і високу (у порівнянні з газовим різанням) швидкість різання, а також високу точність і якість зрізу. Це, в свою чергу, сприяє розширенню можливих технологічних схем, в яких виробники металургійних машин віддають перевагу саме застосуванню ножиць. Так один з найбільших в Україні і світі заводів важкого машинобудування ПАТ «Новокраматорський машинобудівний завод» пропонує на машинах безперервного лиття сортових заготовок (МБЛЗ), процес поперечного різання заготовки на мірні довжини, здійснювати за допомогою летючих гідравлічних ножиць оригінальної конструкції (рис. 1). З урахуванням специфіки розроблених сортових МБЛЗ, що мають розливають заготовки перерізом від  $100 \times 100$  до  $150 \times 150$  мм, різання здійснюється профільованими ножами, що рухаються під кутом  $45^\circ$  до горизонтальної площини.

Дана конструкція ножиць дозволяє розрізати заготовки з максимальним перерізом  $150 \times 150$  мм при температурі не нижче  $800^\circ\text{C}$  зі швидкістю до 70 мм/с і максимальною силою різання 2,4 МН.

Відмінною особливістю ножів в ножицях даної конструкції є той факт, що кут розкриття ножів трикутної форми (див. рис. 1,б) становить  $\alpha=94^\circ$ , а ухил контактних поверхонь –  $\beta=7^\circ$ . Це дозволяє знизити силу різання і підвищити якість зрізу.

При цьому якість поділу має задовольняти основним вимогам, що пред'являються до сортового прокату, зокрема [5]: забезпечення заданої точності по довжині; формування прямого зрізу; мінімізація зминання (затяжка) кінців заготовки та явища задирок.

Точність поперечного різання сортового прокату і допустима величина косини зрізу, а також методи контролю відхилення форми металопродукції (в

деяких країнах колишнього СРСР, в тому числі і в Україні), регламентуються рядом нормативних документів [5–8].

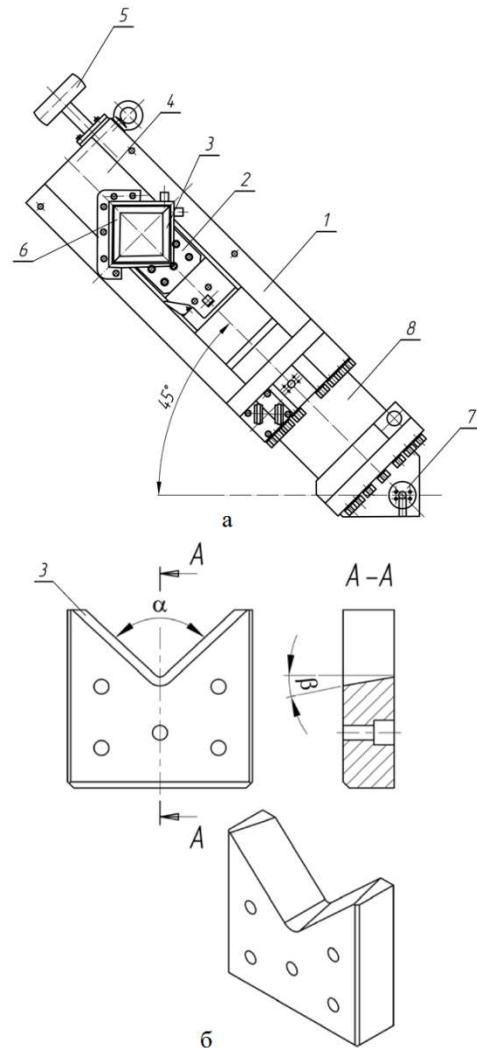


Рис. 1 – Загальний вигляд (а) ножиць летючих гідравлічних конструкції НКМЗ для поперечної гарячого різання на мірні довжини безперервно-литих квадратних заготовок і профільованого ножа (б): 1 – станина; 2, 4 – нижній і верхній супорт; 3, 6 – ножі; 5 – верхній ролик; 7 – циліндрична напрямна; 8 – гідроциліндр механізму різання

Якість різання сортової заготовки характеризується такими дефектами як задирки (або завал кромки) і зминання (затяжка) кінців розкату [9]. Очевидно, що при оптимальному профільованні ножів можна домогтися задоволення вимог до якості різання, знизити показники браку і підвищити вихід придатного металопрокату.

Крім того, з огляду на те, що квадратна заготовка на даних ножицях ріжеться по діагоналі, ще одним показником якості різання є ромбічність поверхні зрізу, яка проявляється у вигляді викривлення геометричної форми поперечного перерізу і відхиляється від вихідної квадратної за рахунок різниці діагоналей. Величина ромбічності має істотне значення для подальшої прокатки заготовок, оскільки від цього залежить їх самовстановлення в калібрі.



Для визначення оптимальної форми профілювання ножа логічним є проведення експериментальних досліджень, проте такий підхід пов'язаний з цілою низкою організаційних і фінансових труднощів. З огляду на можливості сучасної обчислювальної техніки, а також розвиток методів математичного моделювання, доцільно зміщувати акценти в бік теоретичних досліджень процесів обробки металів тиском [10], що, в першу чергу, відноситься до методу скінченних елементів (МСЕ). Цей метод дозволяє значно розширити уявлення про протікання процесів і підвищити ступінь наукової обґрунтованості при прийнятті технологічних і конструктивних рішень. Так в роботах [11, 12] представлена тривимірна математична модель процесу поперечного розділення на ножицях безперервнолитих сортових заготовок в гарячому стані, котра дозволяє адекватно відображати енергосилові і геометричні параметри процесу і найбільш повно врахувати геометричні особливості ріжучого інструменту. При цьому в роботі [12] запропоновано параметри профілювання ножа, але за умов різання заготовки перерізом 120×120 мм при температурі 970°C зі швидкістю 70 мм/с, котрі вочевидь не є оптимальними, оскільки не задовольняють весь реальний діапазон товщин та температур реалізації процесу різання.

**Мета роботи.** Визначення оптимальної форми профілювання фасонного ножа для поділу квадратної заготовки в гарячому стані шляхом математичного моделювання на базі методу скінченних елементів.

**Методика досліджень.** Досягнення зазначеної мети здійснювали на тривимірній математичній моделі процесу поперечного поділу на ножицях безперервнолитих сортових заготовок в гарячому стані [11, 12]. Безпосередньо дослідження проводили в два етапи.

На першому етапі, беручи до уваги результати отримані в роботі [12] та використовуючи відомі підходи до планування експерименту [13, 14], був використаний повний факторний план  $2^4$  і отримані результати моделювання процесу поділу квадратної заготовки в гарячому стані.

Рівні варіювання факторів при реалізації моделювання процесу поділу квадратної заготовки в гарячому стані профілюваними ножами обирались відповідно до виробничих умов та наведені у табл. 1.

Таблиця 1. Рівні варіювання факторів при реалізації моделювання процесу поділу квадратної заготовки в гарячому стані профілюваними ножами

№	Найменування параметру	Фактори	Одиниці вимірювання	Рівні варіювання	
				min	max
1	Температура	$T$	°C	800	1000
2	Розмір квадрату	$h$	мм	100	150
3	Кут розкриття ножів	$\alpha$	градус	90	98
4	Ухил контактних поверхонь	$\beta$	градус	3	11

В результаті були отримані профілі форми торцевої поверхні заготовки після розділення, які підтверджують, що її формоутворення істотно залежить від конфігурації ножа та умов реалізації процесу.

При обробці отриманих результатів моделювання проводилися заміри геометричних параметрів торцевої поверхні після різання за схемою, що представлена на рис. 2.

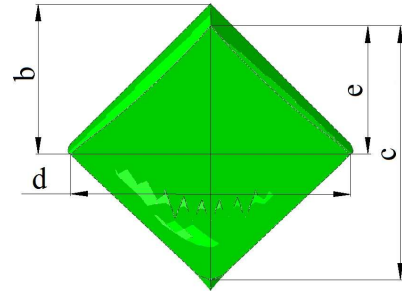


Рис. 2 – Схема вимірів геометричних параметрів торцевої поверхні заготовки після розділення на ножицях

За результатами замірів були розраховані три відносних параметра форми, два з яких характеризують змінання і загин кінців заготовки  $k_b$  і  $k_e$ , а ще один – ромбічність  $k_d$  торцевої поверхні:

$$k_b = \frac{b}{\sqrt{2}h}; \quad (1)$$

$$k_e = \frac{e}{c}; \quad (2)$$

$$k_d = \frac{d}{c}; \quad (3)$$

де  $\sqrt{2}h$  – вихідна діагональ квадратної заготовки зі стороною  $h$ .

В ході обробки результатів для вказаних відносних параметрів були отримані лінійні регресійні рівняння як функція 4-х параметрів (див. табл. 1).

На другому етапі дослідження вирішували оптимізаційну задачу пошуку мінімуму цільової функції:

$$F(\alpha, \beta) = \max[k_d] = \max \begin{cases} k_d(T_{\min}, h_{\min}, \alpha, \beta) \\ k_d(T_{\min}, h_{\max}, \alpha, \beta) \\ k_d(T_{\max}, h_{\min}, \alpha, \beta) \\ k_d(T_{\max}, h_{\max}, \alpha, \beta) \end{cases} \quad (4)$$

З накладанням обмежень:

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha_{\min} \leq \alpha \leq \alpha_{\max} \\ \beta_{\min} \leq \beta \leq \beta_{\max} \\ \max([k_e], [k_b]) \leq 0,5(1 + \Delta) \\ \min([k_e], [k_b]) \geq 0,5(1 - \Delta) \end{array} \right\}, \quad (5)$$

де  $\Delta$  – граничне відхилення змінання і загину кінців (параметри  $k_b$  і  $k_e$ ).

Для вирішення задачі пошуку оптимальних значень  $\alpha$  та  $\beta$  використовували метод узагальненого приведенного градієнта, шляхом використання надбудови «Пошук рішення» в Excel [15].

Результати моделювання. За результатами планованого експерименту розмах значень відносних параметрів форми склав:  $k_b = 0,458 \dots 0,541$ ;  $k_e = 0,456 \dots 0,523$ ;  $k_d = 1,091 \dots 1,182$ .

Вирішення задачі оптимізації залежить від вимог, що висуваються до форми кінця заготовки після різання, насамперед від граничного відхилення  $\Delta$  параметрів  $k_b$  і  $k_e$ .

На рис. 3 представлені залежності значень кутів  $\alpha$  (рис. 3, а) та  $\beta$  (рис. 3, б) профілювання ножів, а на рис. 4 залежності мінімальних і максимальних значень відносних параметрів форми  $k_d$  (рис. 4, а),  $k_b$  і  $k_e$  (рис. 4, б) від граничного відхилення  $\Delta$ .

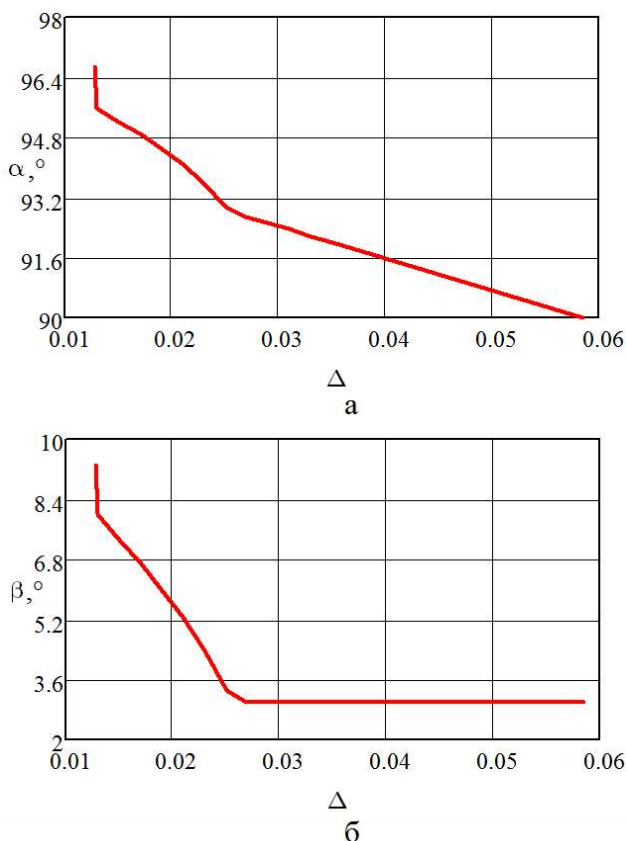


Рис. 3 – Залежності оптимальних значень кутів: а –  $\alpha$  та б –  $\beta$  профілювання ножів від граничного відхилення змінання і загину кінців  $\Delta$

Як можна бачити з приведених графіків, в досліджуваному діапазоні параметрів (див. табл. 1), на оптимальне рішення має суттєвий вплив величина граничного відхилення змінання і загину кінців в межах  $\Delta = 0,0128 \dots 0,0585$ . При цьому подальше зменшення  $\Delta$  не дозволяє знайти оптимального рішення, а подальше збільшення не має сенсу, оскільки кут розкриття ножів  $\alpha$  та ухил контактних поверхонь  $\beta$  сягають своїх мінімальних значень.

Крім того, слід зазначити, що  $\beta$  приймає мінімальне значення вже при  $\Delta = 0,0258$  (див. рис. 3, б), чим і пояснюються зміни в поведінці  $\alpha$  (див. рис. 3, а),  $k_d$  (див. рис. 4, а) та  $k_b$  (див. рис. 4, б)

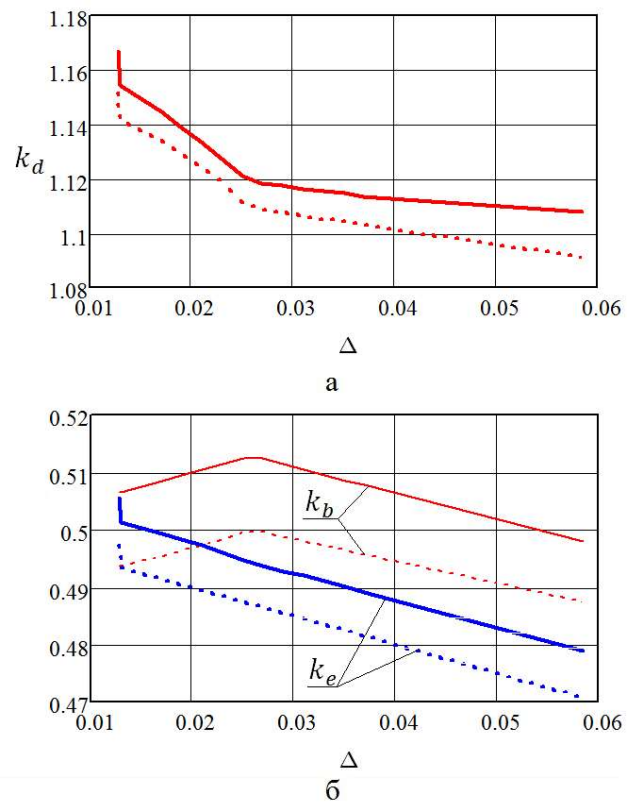


Рис. 4. Залежності мінімальних (---) і максимальних (—) значень відносних параметрів форми  $k_d$  (а),  $k_b$  і  $k_e$  (б) від граничного відхилення змінання і загину кінців  $\Delta$

В доповнення слід звернути увагу на різкий стрибок всіх показників при зменшенні  $\Delta$  з 0,0129 до 0,0128, що пояснюється досягненням мінімально можливого значення  $\Delta$ .

Вочевидь, за умови мінімізації граничного відхилення змінання і загину кінців та дотримання вказаних вище діапазону температур  $T$  та розмірів заготовок  $h$ , оптимальними значеннями слід вважати  $\alpha = 95,58^\circ$  та  $\beta = 8,04^\circ$ . Проте, у разі, якщо вимоги до граничного відхилення  $\Delta$ , можуть бути пом'якшені, або умови реалізації процесу змінені, то і оптимальні значення мають бути змінені відповідно.

**Висновки.** За результатами роботи можна зробити наступні висновки:

- процес поділу металу на ножицях слід вважати більш ефективним з точки зору більш високої швидкості реалізації процесу та мінімізації відходів, а також за рахунок точності і якості зрізу в порівнянні з іншими способами;

- підвищення ступеня наукової обґрунтованості при прийнятті технологічних і конструктивних рішень процесів поділу на ножицях можливе за умови застосування математичного моделювання на базі методу скінченних елементів;

- отримані рівняння регресії основних показників якості поділу безперервнолітої гарячої квадратної

заготовки фасонними ножами на кут, які дозволяють обґрунтувати кути розкриття та ухилу контактних поверхонь ножів, що забезпечують необхідні вимоги до якості різки, з урахуванням умов реалізації процесу;

– в досліджуваному діапазоні параметрів, на оптимальне рішення має суттєвий вплив величина граничного відхилення змінання і загибу кінців в межах  $\Delta = 0,0128 \dots 0,0585$ ;

– за умови мінімізації граничного відхилення змінання і загибу кінців у вказаних діапазонах температур та розмірів заготовок, оптимальні слід вважати кут розкриття ножів  $95,58^\circ$  та ухил контактних поверхонь  $8,04^\circ$ ;

– у разі, якщо вимоги до граничного відхилення, можуть бути пом'якшені, або умови реалізації процесу змінені, то і оптимальні значення мають бути змінені відповідно.

Результати роботи можуть бути рекомендовані для використання при прийнятті проектно-конструкторських і технологічних рішень в питаннях поділу безперервною квадратної заготовки в гарячому стані фасонними ножами на кут.

#### Список літератури:

- Siddhartha Ray. Principles and Applications of Metal Rolling. Cambridge University Press, 2016. 320 p.
- Лукашин Н. Д. Конструкция и расчет машин и агрегатов металлургических заводов: учебник для вузов / Н. Д. Лукашин, Л. С. Кохан, А. М. Якушев – М.: ИКЦ «Академкнига», 2003. – 456 с.: ил.
- Куваев В. М. Модель розривання прокату барабанными летючими ножами / В. М. Куваев, Н.О. Новодранова // Теория и практика металлургии. – Днепро, 2017. – № 1-2 (108-109) – С. 67–70.
- Поляков Б. Н. Новый способ резания на ножницах заготовочных прокатных станов / Б. Н. Поляков // Сталь. – М., 2016. – №1 – С. 36–38.
- Прокат сортовой і фасонний із сталі вуглецевої звичайної якості. Загальні технічні умови : ДСТУ 4484:2005 / ГОСТ 535-2005. – Чинний від 2005-11-25. – К. : Держспоживстандарт України, 2005. – 14 с. – (Держспоживстандарт України).
- Прокат сортовой сталевий гарячекатаний квадратний. Сортамент : ДСТУ 4746:2007 / ГОСТ 2591-2006. – Чинний від 2007-02-26. – К. : Держспоживстандарт України, 2007. – 6 с. – (Держспоживстандарт України).
- ГОСТ 8559-75 Сталь калиброванная квадратная. Сортамент. – Введ. 1976-01-01. – М. : Госстандарт СССР, 1975. – 5 с. – (Государственный комитет СССР по управлению качеством продукции и стандартам).
- Металлопродукція. Методи вимірювання відхилів форми : ДСТУ 6026:2008 / ГОСТ 26877-2008. – Чинний від 2013-01-01. – К. : Держспоживстандарт України, 2008. – 23 с. – (Держспоживстандарт України).
- ГОСТ 21014-88. Прокат черных металлов. Термины и определения дефектов поверхности. – Введ. 1990-01-01. – М. : Госстандарт СССР, 1989. – 60 с. – (Государственный комитет СССР по управлению качеством продукции и стандартам).
- Боровик П. В. Теоретичні дослідження процесів обробки металів тиском на основі методу скінчених елементів: Навч. посіб. / П. В. Боровик. – Алчевськ: ДонДТУ, 2012. – 170 с.
- Боровик П. В. 3D модель процесса поперечного разделения на ножницах непрерывнолитых сортовых заготовок / П. В. Боровик, П. А. Петров // Сборник научных трудов ДонДТУ. – Алчевск, 2013. – Вып. 41. – С. 151–155.
- Боровик П. В. Обоснование профилировки фасонного ножа для разделения квадратной заготовки в горячем состоянии / П. В. Боровик // Обработка материалов давлением. – 2019. – № 1. – С. 179–185
- Оптимальне планування експерименту при дослідженні технологічних процесів, приладів і систем: навч. посіб. / М. Д. Кошовий, О. М. Костенко, О. В. Заболотний та ін. – Х.: Нац. аерокосм. ун-т «Харк. авіац. ін-т», 2010. – 161 с.
- Кузьмичов А. І. Оптимізаційні методи і моделі: практикум в Excel: навч. посіб. / А. І. Кузьмичов – К.: ВПЦ АМУ, 2013. – 438 с.

#### References (transliterated)

- Siddhartha Ray. Principles and Applications of Metal Rolling. Cambridge University Press, 2016. – 320 p.
- Lukashin N. D. Konstrukcija i raschet mashin i agregatov metallurgicheskikh zavodov: uchebnik dlja vuzov / N. D. Lukashin, L. S. Kohan, A. M. Jakushev – Moscow: IKC «Akademkniga», 2003. – 456 p.: il.
- Kuvayev V. M. Model' rozrizannya prokatu barabanny'my' letyuchy'my' nozhy'cyamy' / V. M. Kuvayev, N.O. Novodranova // Teoriya i praktika metallurgii. – Dnepr, 2017. – No 1-2 (108-109) – P. 67–70.
- Poljakov B. N. Novyj sposob rezaniya na nozhnicah zagotovochnyh prokatnyh stanov / B. N. Poljakov // Stal'. – Kiev : 2016. – No1 – P. 36–38.
- Prokat sortovy'j i fasonny'j iz stali vuglecevoyi zvy'chajnoyi yakosti. Zagal'ni texnichni umovy' : DSTU 4484:2005 / GOST 535-2005. – Chy'nny'j vid 2005-11-25. – Kiev : Derzhspozhy'vstandart Ukrainy, 2005. – 14 p. – (Derzhspozhy'vstandart Ukrainy).
- Prokat sortovy'j staley'j garyachekatany'j kvadratny'j. Sortament : DSTU 4746:2007 / GOST 2591-2006. – Chy'nny'j vid 2007-02-26. – Kiev : Derzhspozhy'vstandart Ukrainy', 2007. – 6 p. – (Derzhspozhy'vstandart Ukrainy).
- GOST 8559-75 Stal' kalibrovannaja kvadratnaja. Sortament. – Vved. 1976-01-01. – Moscow : Gosstandart SSSR, 1975. – 5 p. – (Gosudarstvennyj komitet SSSR po upravleniju kachestvom produkcii i standartam).
- Metalloprodukcija. Metody' vy'miryuvannya vidxy'liv formy' : DSTU 6026:2008 / GOST 26877-2008. – Chy'nny'j vid 2013-01-01. – Kiev : Derzhspozhy'vstandart Ukrainy, 2008. – 23 p. – (Derzhspozhy'vstandart Ukrainy').
- GOST 21014-88. Prokat chernyh metallov. Terminy i opredelenija defektov poverhnosti. – Vved. 1990-01-01. – Moscow : Gosstandart SSSR, 1989. – 60 p. – (Gosudarstvennyj komitet SSSR po upravleniju kachestvom produkcii i standartam).
- Borovik P. V. Teorety'chni doslidzhennya procesiv obrobky' metaliv ty'skom na osnovi metodu skincheny'x elementiv: navch. posib. / P. V. Borovik. – Alchevs'k: DonDTU, 2012. – 170 p.
- Borovik P. V. 3D model' processa poperechnogo rozdeleniya na nozhnicah nepreryvnolityh sortovyh zagotovok / P. V. Borovik, P. A. Petrov // Sbornik nauchnyh trudov DonGTU. – Alchevsk, 2013. – Vyp. 41. – P. 151–155.
- Borovik P. V. Obosnovanie profilirovki fasonnogo nozha dlja razdeleniya kvadratnoj zagotovki v gorjachem sostojanii / P. V. Borovik // Obrabotka materialov davleniem. – 2019. – No 1. – P. 179–185.
- Opty'mal'ne planuvannya eksperymentu pry' doslidzhenni tehnologichny'x procesiv, pry'ladiv i sy'stem: navch. posib. / M. D. Koshovy'j, O. M. Kostenko, O. V. Zabolotny'j ta in. – Kharkiv.: Nacz. aerokosm. un-t «Khark. aviacz. in-t», 2010. – 161 p.
- Kuz'my'chov A. I. Opty'mizacijni metody' i modeli: prakty'kum v Excel: Navch. posib. / A. I. Kuzmy'chov – Kiev : VPCz AMU, 2013. – 438 p.

Надійшла (received) 10.11.2019

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

**Боровик Павло Володимирович (Боровик Павел Владимирович, Borovik Pavlo Volodymyrovych)** – кандидат технічних наук, доцент, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, доцент кафедри «Машинознавство та обладнання промислових підприємств»; м. Северодонецьк, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5353-2022>; e-mail: borovikpv@ukr.net.

УДК 621.7.044

***В. В. ДРАГОБЕЦЬКИЙ, С. В. ШЛИК, О. О. НАУМОВА, І. О. КУЗЬВ, Д. В. МОЛОШТАН*****МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ВИБУХОВОУДАРНОГО НАВАНТАЖЕННЯ  
ЗМІЦНЮВАНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ГІРНИЧОГО УСТАТКУВАННЯ**

Обґрунтовано актуальність досліджень щодо підвищення зносостійкості деталей гірничого обладнання. Це пов'язано з тим, що на даний час фізична зношеність виробничих фондів гірничо-металургійного комплексу України становить 70–75 %. Зазначено, що сучасні методи розрахунку процесу деформаційного зміцнення при імпульсних навантаженнях базуються на теоріях поширення пружно-пластичних хвиль у матеріалах. При цьому визначальні співвідношення ґрунтуються на фізико-механічному підході. Для теоретичного аналізу динамічних задач найбільш доцільними є різні варіанти чисельних методів. Надано метод розрахунку параметрів навантаження для зміцнення та одержання відливки заданої структури і фізико-механічними характеристиками. Завдання визначення потрібного навантаження зводиться до розв'язання задачі одностороннього і двостороннього зміцнення при імпульсних навантаженнях, а також з урахуванням хвилі розвантаження при односторонньому зміцненні. Функціонал мінімізується на сімействі кривих (тиск продуктів детонації, швидкість). Обчислення параметрів заряду вибухової речовини (тиск продуктів детонації, швидкість) здійснюється за методом покоординатного спуску. Моделювання процесу зміцнення зуба ковша екскаватора виконувалося також методом скінченних елементів у системі Ansys / Autodyn. Виконано розрахунок інтенсивності напружень і деформацій в умовах одностороннього і двостороннього зміцнення при односторонньому розвантаженні. Визначальні співвідношення для швидкості пластичних деформацій доцільно використовувати у формі Гілмана–Джонстона. З використанням цього співвідношення, можливо описати процес загасання передвісника і зміну загальної щільності дислокацій. Дослідження можуть бути використані при оптимальному проектуванні процесів зміцнення пластичним деформуванням і штампування деталей, що працюють в умовах інтенсивного зносу і знакозмінних навантажень.

**Ключові слова:** зміцнення, зуб ковша екскаватора, інтенсивність напружень, щільність дислокацій, оптимізація, інтенсивне зношування, знакозмінне навантаження.

***В. В. ДРАГОБЕЦЬКИЙ, С. В. ШЛИК, Е. А. НАУМОВА, И. А. КУЗЕВ, Д. В. МОЛОШТАН*****МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЗРЫВООУДАРНОГО НАГРУЖЕНИЯ  
УПРОЧНЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ГОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

Обоснована актуальність досліджень по підвищенню зносостійкості деталей горного обладнання. Это связано с тем, что в настоящее время физическая изношенность производственных фондов горно-металлургического комплекса Украины составляет 70-75%. Отмечено, что современные методы расчета процесса деформационного упрочнения при импульсных нагрузках базируются на теориях распространения упругопластических волн в материалах. При этом определяющие соотношения основаны на физико-механическом подходе. Для теоретического анализа динамических задач наиболее целесообразными являются различные варианты численных методов. Предоставлено метод расчета параметров нагрузки для укрепления и получения отливки заданной структуры и физико-механическими характеристиками. Задача определения нужной нагрузки сводится к решению задачи математического программирования. В этом случае целевая функция принимается в виде квадратичного функционала Гаусса. Функционал минимизируется на семействе кривых (давление продуктов детонации, скорость). Вычисление параметров заряда взрывчатого вещества (давление продуктов детонации, скорость) осуществляется методом покоординатного спуска. Моделирование процесса укрепления зуба ковша экскаватора производилось также методом конечных элементов в системе Ansys / Autodyn. Выполнен расчет интенсивности напряжений и деформаций в условиях одностороннего и двустороннего укрепления взрывом, а также с учетом волны разгрузки при одностороннем укреплении. Определяющие соотношения для скорости пластических деформаций целесообразно использовать в форме Гилмана–Джонстона. С использованием этого соотношения, описать процесс затухания предвестника и изменение общей плотности дислокаций. Исследования могут быть использованы при оптимальном проектировании процессов укрепления пластическим деформированием и штамповки деталей, работающих в условиях интенсивного износа и знакопеременных нагрузок.

**Ключевые слова:** укрепление, зуб ковша экскаватора, интенсивность напряжений, плотность дислокаций, оптимизация, интенсивный износ, знакопеременные нагрузки.

***V. DRAGOBETSKYI, S. SHLYK, O. NAUMOVA, I. KUZIEV, D. MOLOSHTAN*****MATHEMATICAL MODEL OF EXPLOSIVE LOADING  
OF STRENGTHENED ELEMENTS OF MINING EQUIPMENT**

It is noted that modern methods of calculating the process of the strain hardening under the pulsed loads are based on the theories of propagation of the elastic-plastic waves in materials. In this case, the determining relations are based on the physical and mechanical approach. Various versions of numerical methods are most appropriate for the theoretical analysis of the dynamic problems. A method for calculating the load parameters to strengthen and obtain castings of a given structure and physical and mechanical characteristics is provided. The task of determining the required load is reduced to solving a problem of the mathematical programming. In this case the objective function is taken in the form of a quadratic Gaussian functional. The functional is minimized on the family of curves (the pressure of the detonation products, the speed). The calculation of the parameters of the explosive charge (the pressure of the detonation products, the speed) is carried out by the method of coordinate descent. The modeling of the process of the strengthening of the bucket tooth of the excavator was also carried out by the finite element method in the Ansys / Autodyn system. The calculation of the intensity of stresses and strains in the conditions of unilateral and bilateral strengthening by the explosion, in made and also taking into account the unloading wave during the unilateral strengthening. It is advisable to use the defining relations for the rate of the plastic deformations in the form of Gilman-Johnston. Using this relation, describe the precursor attenuation process and the change in the total dislocation density. The research can be used in the optimal design of the processes of strengthening by the plastic deformation and stamping of parts working under conditions of the intensive wear and alternating loads.

**Keywords:** strengthening, excavator bucket tooth, stress intensity, dislocation density, optimization, intensive wear, alternating loads.



**Вступ.** Гірничо-металургійний комплекс України (ГМК) посідає основне місце в національній економіці України, забезпечуючи третину промислового виробництва і приблизно 40 % експортної виручки.

Резервом підвищення довговічності деталей гірничого обладнання є застосування поверхневих методів зміцнення, які пов'язані з використанням концентрованих потоків енергії.

На даний час у гірничодобувній промисловості докладають значних зусиль щодо збільшення надійності й довговічності деталей. Все більш уваги виробники приділяють збільшенню терміну служби сильно зношуваних деталей (ковші екскаваторів, їх зуби та коронки, долота, шарошки та ін.), зниженню матеріаломісткості, витрат на придбання нових деталей замість зношених і підвищенню експлуатаційної надійності конструкцій.

У зв'язку із зазначеним актуальним є питання підвищення зносостійкості деталей гірничо-збагачувального обладнання, яке ілюструється тим фактом, що в цій галузі виробництво запасних деталей за економічними витратами можна порівняти з виробництвом деталей, призначених для монтажу нового обладнання. Задля підвищення зносостійкості гірничо-збагачувального обладнання – зубів ковшів екскаваторів, броні та футеровок дробарок, біт молоткових дробарок, футеровок кульових й стрижневих млинів – найбільшого поширення набули методи зміцнення пластичним деформуванням, зокрема, енергією вибуху.

Проте не всі можливості й аспекти дії вибуху на процес деформаційного зміцнення розкриті та не знайшли належного застосування. Окрім того, не встановлені і теоретично не обґрунтовані оптимальні режими вибухового навантаження поверхні зміцнювальних деталей і комбіновані методи зміцнення.

Отже, дослідження й розробки, спрямовані на вирішення завдання підвищення ресурсу елементів гірничодобувного обладнання, є актуальною науково-практичною задачею та забезпечує значні економічні вигоди.

**Аналіз стану питання.** Сьогодні фахівці в галузі вибухової металообробки працюють над створенням універсальних методів визначення силових характеристик процесів, принципово нового обладнання й оснащення, виявлення нових аспектів вибухова металообробки та розробкою комбінованих технологій з використанням імпульсних джерел енергії [1,2]. Сучасні методи розрахунку процесу деформаційного зміцнення при імпульсних навантаженнях базуються на теоріях поширення пружно-пластичних хвиль у матеріалах. При цьому визначальні співвідношення ґрунтуються на фізико-механічному підході.

**Аналіз основних досягнень і літератури.** **Існуючі методи розв'язання задачі.** У динамічних задачах ураховуються сили інерції. Якщо у всій області матеріал знаходиться в стані пластичної течії, то задачі динаміки приводяться до варіаційного рівняння [3–11], у якому до потужності заданих зовнішніх сил слід

додати потужність сил інерції. Зазначимо основні методи розрахунку динамічних задач.

Метод прямих для розрахунку пружнопластичних течій. Цей метод використовувався для розв'язання динамічних задач у межах квазігідродинамічної моделі М. Вілкінсом [6, 12]. Для розрахунку нестационарних рухів твердого тіла, що деформується з фазовими переходами, метод розвивався у роботах Р. І. Нігматуліна та Н. Н. Холіна [13, 14]. У роботах [13, 14] цей метод використовується для розрахунку нестационарних течій пружнов'язкопластичних середовищ з дислокаційною кінетикою непружного деформування.

Для розрахунку динамічних задач широко використовується метод Лакса-Вендроффа для розв'язання задач газової динаміки та твердого тіла, що деформується, як для малих, так і для великих деформацій. Для випадку малих деформацій схема числового розрахунку, запропонована П. Лаксом і Б. Вендроффом, істотно спрощується і стає досить зручною для розрахунку пружнопластичних течій. Схема Лакса-Вендроффа доволі ефективна під час розв'язання гіперболічних систем, записаних у дивергентній формі.

Для теоретичного аналізу процесів деформаційного зміцнення з імпульсним навантаженням найприйнятнішими є чисельні методи, серед яких метод скінчених різниць історично та технічно виявився найбільш підготовленим для ПЕОМ [3–5]. Суть методу полягає в тому, що для наближеного розв'язання крайової задачі, що описується системою диференціальних рівнянь при заданих крайових умовах, досліджувана область розбивається на комірки родинями координатних ліній. Точки перетину координатних ліній є вузлами та підрозділяються на внутрішні та граничні. Шукана функція замінюється сукупністю значень у вузлових точках. Таке уявлення дозволяє звести задачу до розв'язання системи лінійних алгебраїчних рівнянь і знайти чисельні значення шуканої функції у вузлах ґратки. Метод скінчених різниць покладено в основу великої кількості алгоритмів стосовно завдань міцності, гідро- і газодинаміки, стійкості й коливань, і, незважаючи на низку суттєвих недоліків, добре зарекомендував себе і дозволив отримати розв'язання цілого ряду важливих завдань. З огляду на оцінювання похибок, стійкості тощо, метод найбільш розроблений і добре узгоджується з рівняннями динаміки пружно-пластичних середовищ. Основним недоліком існуючих методів є те, що або вони недостатньо наочні, або не вирішують задачу оптимізації параметрів навантаження згідно отриманих структур та деформацій зміцнення.

**Метою роботи** є розробка математичної моделі процесу імпульсного деформаційного зміцнення з визначенням параметрів, які мінімізують зношення за масою.

**Постановка задачі.** Під дією ударних хвиль відбувається деформація кристалічної ґратки матеріалу (глибина пластичної деформації), яка

призводить по аналогії з поверхневою пластичною деформацією до зміни фізико-механічних властивостей матеріалу (зокрема й підвищення твердості та зносостійкості новоутворених унаслідок відколу фракцій матеріалу). Природно припустити, що чим на більш дрібні фракції зерен матеріалу відбувається дроблення, тим він інтенсивніше зміцнюється з підвищенням його механічних характеристик.

Повторні механічні ударні навантаження сприяють подальшій деформації їх кристалічних ґраток і підвищенню фізико-механічних властивостей. Можна припустити, що саме такий механізм зміни цих властивостей зумовив першопричинне підвищення зносостійкості різального інструменту, виявлене Ю. В. Савченко [15, 16] під час випробувань на зносостійкість різального інструменту з регенованих твердих сплавів.

Характер та інтенсивність імпульсного впливу на деталі гірничого устаткування навіть в одному процесі можуть суттєво відрізнятися та відкривають можливості для зміни геометричних, механічних, фізичних та інших властивостей. Збурення, що поширюються з певними кінцевими швидкостями у вигляді хвиль напружень (навантаження, розвантаження, а також відбитих), утворюють у матеріалах області збурення, які з певним часом розширюються. Кожній області збурення відповідає напружено-деформований стан, що характеризується тензором напружень і тензором деформацій, які визначаються природою збурення.

У межах безпосередньої дії імпульсного силового чинника зароджується область збурення навантаження, що поширюється з кінцевою швидкістю у вигляді хвилі розвантаження. Відбита хвиля навантаження, поширюючись у зворотному напрямку, утворює вторинну область збурень хвилі. В умовах збереження суцільності середовища під час переходу фронту хвилі напружень з однієї області збурення в іншу переміщення частинок середовища є безперервними.

Процес навантаження мішені при цьому також супроводжується подальшим впливом тиску продуктів детонації, що розширюються, зумовлюючи додаткову її деформацію. Проходження ударних хвиль у процесі вибухового навантаження призводить до стрибкоподібної зміни параметрів стану та руху середовища, зростанню його ентропії, переміщенню частинок середовища в напрямку фронту хвилі й т. д.

Отже, для опису елементарного процесу вибухового впливу необхідно враховувати чинником, що пов'язані з деформацією, нагріванням, фазовими перетвореннями та руйнуванням.

Як зазначалося вище під час дії ударних хвиль і тиску продуктів детонації як бризантних вибухових речовин, відбувається дроблення зерен матеріалу на дрібні фракції. При цьому хімічна взаємодія продуктів детонації зі складовими сплаву не спричиняє окислення меж фракцій.

Зі сказаного випливає, що вплив інтенсивних імпульсних навантажень під час вибухового навантаження, спричиняє зміцнення матеріалу. Ці процеси залежать від геометрії зміцнюваних виробів, напружено-деформованого стану середовища й умов навантаження (тривалості імпульсу, його форми, способу підведення енергії та ін.).

**Методи дослідження** напружено-деформованого стану. Визначення напружено-деформованого стану мішені (пластини) зі сплаву Г13Л визначаємо за допомогою сіткового методу. Процес розглядається як двостадійний: 1) набуття початкової швидкості під час проходження ударної хвилі по зміцнюваному чому матеріалу та вихід її на вільну поверхню; 2) прискорення вузлів матеріалу під дією продуктів детонації накладного заряду вибухової речовини.

Під час аналізу використовуємо «вузлову схему». Матеріал вкриваємо лагранжевою сіткою X1, X2, що пов'язана з серединною поверхнею. Вузлова точка розрахункової сітки кожного фізичного елемента є точкою приведення відповідної маси, у якій визначаються всі шукані величини. Масові точки з'єднуються невагомими розтяжними прямими відрізками. Матеріал пластини вважаємо ізотропним та пружнопластичним.

Прискорення вузлів сітки серединної поверхні, швидкості та переміщення визначаємо з рівнянь руху для кожного точкового вузла матеріалу, що зміцнюється:

$$\begin{aligned} \nabla \cdot M_{mn}^{\alpha} - Q_{mn} \cdot R_{\gamma mn}^{\alpha} + P_{mn}^{\alpha} = \\ = \rho \cdot W_{mn}^{\alpha} - \rho_1 \cdot c_1 \cdot W_{mn}^{\alpha}, \end{aligned}$$

$$M_{mn}^{\alpha} \cdot R_{\gamma mn}^{\alpha} + \nabla \cdot Q_{mn} + P_{mn}^3 = \rho \cdot W_{mn}^3,$$

$$\nabla \cdot L^{\alpha} - Q_{mn}^{\alpha} = 0, \quad (1)$$

де  $\nabla$  – знак коваріантного диференціювання;

$M^{\alpha}$  – поздовжні сили;

$Q_{mn}$  – поперечні сили;

$L^{\alpha}$  – згинальні моменти;

$\rho$  – приведена маса;

$W_{mn}^{\alpha}$  – прискорення;

$P_{mn}^{\alpha}$  – силовий вплив вибухового навантаження;

$\rho_1, c_1$  – щільність і швидкість звуку в середовищі за матеріалом, що зміцнюється.

З рівнянь (1) визначаються компоненти прискорень  $W_{mn}^{\alpha}$  у всіх вузлах, а також положення вузлів у новий момент часу  $\tau$ . Для цього використовуються співвідношення

$$W_{2,\tau+1} = \dot{W}_{2,\tau}(\Delta\tau)^2 + 2W_{2,\tau} - W_{2,\tau-1},$$

$$W_{1,\tau+1} = \dot{W}_{1,\tau}(\Delta\tau)^2 + 2W_{1,\tau} - W_{1,\tau-1}, \quad (2)$$

де  $\Delta\tau$  – величина кроку інтегрування.

Після обчислення координат вузлів визначаються величини деформацій. Геометричні співвідношення для переміщення та деформації приймаються у формі Тимошенка. На підставі узагальненого закону Гука визначається тензор напружень. За допомогою

інтегрування за товщиною матеріалу обчислюються мембранні перерізуючі сили, що, а також згинальні моменти.

Критерій плинності визначається функцією навантаження:

$$F(\sigma_{\alpha\beta}^{mn}, \varepsilon_{\alpha\beta}^{mnl}, \mu_s, k_i) = 0. \quad (3)$$

При  $dF/dt > 0$ , коли Закон Гука вже не є дійсним, використовуємо уточнену теорію пластичної течії або ускладнену модель Г. Бакхауза. При цьому

$$dF_i = \frac{\partial \sigma_i}{\partial T} dT + \frac{\partial \sigma_i}{\partial \varepsilon_i} d\varepsilon + \frac{\partial \sigma_i}{\partial \dot{\varepsilon}_i} d\dot{\varepsilon} + \frac{\partial \sigma_i}{\partial t} dt + \frac{\partial \mu_k}{\partial \varepsilon_i} d\varepsilon + \frac{\partial \mu_k}{\partial \varepsilon_i} d\varepsilon + \frac{\partial \mu_k}{\partial t} dt \quad (4)$$

де  $\sigma_i$  – інтенсивність напружень;

$\varepsilon_i, \dot{\varepsilon}_i$  – інтенсивність деформацій і швидкостей деформацій;

$T$  – температура;

$t$  – час;

$\mu_k$  – параметри, що характеризують внутрішню структуру матеріалу, нижній індекс – номер параметра.

На кожному кроці розрахунку визначається, чи не наступив момент переходу матеріалу зі стійкого стану у нестійкий за залежностями:

$$\frac{d(\sigma_s/\exp\varepsilon)dx}{d\varepsilon} > 0, \quad \frac{d\dot{\varepsilon}}{d\varepsilon} > 0. \quad (5)$$

Визначення деформацій, що відповідають оптимальній структурі матеріалів по експлуатаційним характеристикам і дорівнюють граничним рівномірним можливо з використанням співвідношення для швидкості пластичних деформацій у формі Гілмана-Джонстона

$$\varepsilon_i = \frac{4}{3} b C_0 \left( n_0 + \frac{3}{4} m \varepsilon_i \right) \exp \left[ -2 \left( D + \frac{3}{4} H \frac{\varepsilon_i}{\sigma_i} \right) \right], \quad (6)$$

де  $n_0$  – початкова щільність;

$b$  – вектор Бюргерса;

$m$  – коефіцієнт розмноження дислокацій;

$H$  – постійна зміцнення;

$C_0$  – швидкість звуку в поперечному напрямку;

$D$  – емпірична постійна.

Співвідношення (6) має екстремум (при фіксованих значеннях). При досягненні екстремуму або критичного значення пластичних деформацій, при зростанні загальної щільності дислокацій «замикаються» рухливі дислокації і досягається гранично можливе зміцнення й впорядкована структура.

Значення критичних деформацій визначається при  $d\dot{\varepsilon}/d\varepsilon = 0$ . Критичне значення деформацій відповідає другій умові локалізації деформацій (втрата стійкості)

$$\varepsilon_i = \frac{4}{3m} \left( \frac{\sigma_i}{H} - n_0 \right). \quad (7)$$

Визначення тиску продуктів детонації  $P_y$  на матеріал, що зміцнюється, у момент виходу ударної хвилі на вільну поверхню зі сталі Гадфільда проводиться з урахуванням умови Чепмена-Жуге. Годі згідно з [17–19], відношення тиску на площині  $P_p$  до тиску продуктів детонації  $P_e$  дорівнює:

$$P_p \cdot P_e^{-1} = 0,5 \cdot k^{-1} \cdot (3 \cdot k - 1)^{2 \cdot k \cdot (k-1)^{-1}}, \quad (8)$$

де  $k$  – показник адиабати вибухової речовини.

З огляду на спад тиску продуктів детонації біля жорсткої стінки та акустичну жорсткість матеріалу, що зміцнюється, у момент виходу ударної хвилі на вільну поверхню, тиск продуктів детонації вибухової речовини на поверхні буде визначатися виразом:

$$P_p = (0,5k^{-1} \cdot (3 \cdot k - 1))^{2 \cdot k \cdot (k-1)^{-1}} \times P_e \cdot (H \cdot D^{-1} (H \cdot D^{-1} + t_0))^k, \quad (9)$$

де  $t_0 = \delta_p / D$ ;

$\delta_p$  – товщина металу пластини;

$D$  – швидкість детонації накладного заряду вибухової речовини;

$C_p$  – швидкість ударної хвилі в пластині

$$C_p = a + \lambda U_p;$$

$U_p$  – масова швидкість пластини;

$a, \lambda$  – коефіцієнти ударного стиснення металу;

$H$  – висота накладного заряду вибухової речовини.

У результаті отримуємо для визначення  $P_p, U_p$  і  $C_p$  систему з трьох рівнянь, яка відповідає моменту виходу ударної хвилі на вільну поверхню:

$$\left. \begin{aligned} P_p &= (0,5k^{-1} \cdot (3 \cdot k - 1))^{2 \cdot k \cdot (k-1)^{-1}} \cdot H \cdot P \times \\ &\times \left( H \cdot D^{-1} \left( H \cdot D^{-1} + \delta_p (a + \lambda \cdot U_p) \right) \right)^k, \\ C_p &= a + \lambda U_p, \\ P_p &= \rho \cdot U_p \cdot C_p. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

При цьому слід урахувувати залежності від висоти заряду:  $P_p = P_p(H)$  і  $U_p = U_p(H)$  [1].

Створення косою (похилого) фронту ударної хвилі найпростіше здійснюється використанням проміжних середовищ між вибуховою речовиною (ВР) та зміцнюваною поверхнею елементів гірничого устаткування. У цьому випадку кут нахилу косої ударної хвилі дорівнює

$$\beta = \arccos C/D, \quad (11)$$

де  $C$  – швидкість поширення ударної хвилі в проміжному середовищі;

$D$  – швидкість детонації вибухової речовини.

Падіння ударної хвилі на границю розділу двох середовищ з різною акустичною жорсткістю

спричиняє виникнення відбитої хвилі та тієї, що проходить границю розділу хвилі

$$\sigma_n = 2\rho_1 C_1 l_1 \cos \beta P_m / (\rho_2 C_2 \cos \gamma + \rho_1 C_1 \cos \beta) \quad (12)$$

де  $\gamma$  – кут, який утворений фронтом хвилі, що виходить, з границею поділу;

$\rho_1 C_1$  і  $\rho_2 C_2$  – акустичні жорсткості проміжного прошарку й матеріалу виробу.

Кут нахилу фронту ударної хвилі в проміжному середовищі з поверхнею зміцнюваної деталі дорівнює

$$\gamma = \arccos[(D^2 - C_1^2)^{0,5} / D] \quad (13)$$

Під час оцінювання напружено деформованого стану в зміцнюваному середовищі варто враховувати під час поширення хвилі стиснення та розтягування головне нормальне напруження  $\sigma_1$ , яке діє в напрямку поширення хвилі. Головна деформація  $\epsilon_1$  визначається об'ємними деформаціями:

$$\omega = \epsilon_1; \epsilon_2 = \epsilon_3 = \epsilon_0; \epsilon_1 = \omega.$$

Зв'язок між  $\sigma_1$  і  $\epsilon_1$  у випадку плоскої симетрії визначається зі  $\sigma_1 = \sigma_1(\epsilon_1, \sigma)$  співвідношення

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \left( \frac{1}{\sqrt{2}} \right) (3I_2(\sigma) - I_1^2(\sigma))^{0,5} = \\ &= K \cdot \sqrt{2} / 3 [3I_2(\epsilon) - I_1^2(\epsilon)]^{0,5}, \end{aligned} \quad (14)$$

де  $K$  – модуль об'ємного стиснення;

$I_1(\sigma)$ ,  $I_2(\sigma)$ ,  $I_1(\epsilon)$ ,  $I_2(\epsilon)$  – інваріанти тензора напружень і деформацій.

Ряд авторів [7, 44] вважає, що для оцінювання максимальних дотичних напружень під час навантаження металу ковзною ударною хвилею [6, 20] достатньо використовувати залежність:

$$\tau_{\max} = \beta P_u \quad (15)$$

де  $\beta$  – коефіцієнт, близький до одиниці, особливо в разі, якщо швидкість поширення фронту  $C_1$  близька до швидкості пружних хвиль у матеріалі. Різниця у напруженнях, які пораховані за залежностями (14) і (15), не перевищує 15 %, що для процесів імпульсної металообробки цілком допустимо. Значення  $P_u$  відповідає тиску на зміцнюваній поверхні  $P_f$ .

Розмноження дислокацій можливо, коли  $\tau_{\max} > \tau_{кр}$  [7]

$$\tau_{кр} = Gb/l_d \quad (16)$$

де  $G$  – модуль зсуву;

$b$  – модуль вектору Бюргерса;

$l_d$  – довжина дислокаційної лінії.

За довжину дислокаційної лінії приймаємо довжину орієнтованих включень голкоподібної форми. Для сталі Г13Л  $l = 2 \div 15$  мкм.

Для сталі  $G = 84$  ГПа;  $b = 0,248$  нм. З нормальним тиском близько 2000 МПа дотичні напруження в металі складуть  $\tau = 1000$  МПа. Цього достатньо для дроблення структур з джерелом дислокацій, для яких  $l_d \geq 20$  нм.

### Результати чисельного моделювання.

Моделювання процесу зміцнення зуба ковша екскаватора здійснювалося також методом скінченних елементів в системі Ansys / Autodyn. Результати розрахунку інтенсивності напружень і деформацій в умовах одностороннього та двостороннього зміцнення вибухом, а також з урахуванням хвилі розвантаження у разі одностороннього зміцнення показані на рис. 1

Розв'язання системи рівнянь (6–15) здійснюємо методом прямої прогонки [21–24]. На кожному кроці інтегрування при заданому співвідношенні мас заряду вибухової речовини визначаємо значення деформацій, що відповідають гранично рівномірним.

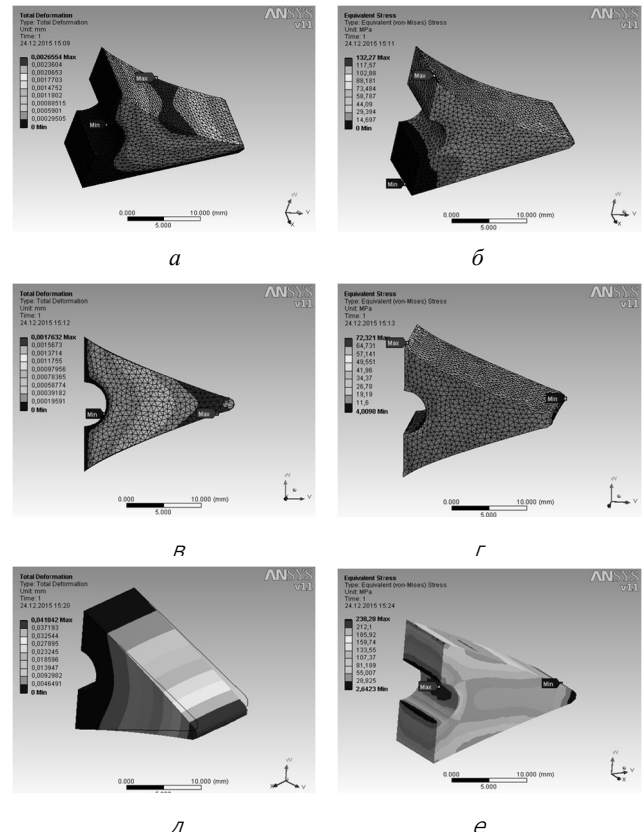


Рис. 1 – Епюри деформацій та інтенсивності напружень у разі одно– (а, б), двостороннього (в, г) та одностороннього з урахуванням хвилі розвантаження (д, е) зміцнення зуба ковша екскаватора тиском 40 ГПа

У разі тисків, характерних для вибухового зміцнення, відбувається утворення дислокацій і точкових дефектів з подальшим формуванням двійників. У деяких речовин, зокрема, у сталі Гадфільда, відбуваються зумовлені дією ударних хвиль трансформації кристалічних ґраток [25–27]. Для сталі Гадфільда спотворення ґратки становить 0,27 % з розміром області поперечного розсіювання 100 НМ [27]. Ударно-хвильова обробка вуглецю, що належить до складу сталі Гадфільда, підвищує його хімічну активність. Ударні хвилі істотно впливають і на протікання дифузійних процесів. Для сплавів металів з вуглецем у ряді випадків спостерігається аномальне прискорення дифузії. Сплави, що містять марганець, у

разі хвильового навантаження здатні до концентрації вакансій і міжвузлових атомів.

**Висновки.** Моделювання процесу вибухового зміцнення зубів ківшів екскаваторів виконано з використанням скінченно-різницевої моделі динаміки навантаження зміцненого матеріалу, що дозволяє визначити параметри імпульсного навантаження по зміцненій поверхні з наступним отриманням еквівалентних напружень по тілу оброблюваної деталі осьової деформації методом скінченних елементів у системі Ansys / Autodyn. Враховано те, що приріст зносостійкості поверхневого шару деталей, що працюють в умовах ударно-абразивного зношування, є найбільшими на границі стадії рівномірної деформації матеріалу. Оптимальний тиск та швидкість детонації при вибуховому зміцненні визначається з рішення системи рівнянь зміни параметрів стисненого ударною хвилею металу і умови Чепмена-Жуге.

#### Список літератури

1. Драгобецкий В. В. Применение взрывотермического упрочнения в процессах импульсной обработки. *Сборник научных трудов. Вып. 15.* Алчевск: ДГМИ. С. 188–195.
2. Драгобецкий В. В. Постановка задачи пластического деформирования при совмещении операций штамповки и сварки взрывом. *Проблемы создания новых машин и технологий. Научные труды КГПУ. Вып. 2/1999.* Кременчуг, 1999. С. 270–274.
3. *Импульсная обработка металлов давлением. Сб. статей под ред. В. К. Борисевича.* М.: Машиностроение, 1977. 144 с.
4. Борисевич В. К., Галиев Ш. У. Проблема пластического деформирования тонколистовых заготовок взрывом в жидкости. *Импульсная обработка металлов давлением. Межвуз. темат. сборник научн. трудов. Вып. 8.* Харьков: ХАИ, 1979. С. 3–14.
5. Борисевич В. К., Галиев Ш. У. Проблема пластического деформирования тонколистовых заготовок взрывом в жидкости. *Импульсная обработка металлов давлением. Межвуз. темат. сборник научн. трудов. Вып. 8.* Харьков: ХАИ, 1979. С. 3–14.
6. Майборода В. П., Кравчук А. С., Хомин Н. Н. *Скоростное деформирование конструкционных материалов.* М.: Машиностроение, 1986. 264 с.
7. Васидзу К. *Вариационные методы в теории упругости и пластичности. Пер. с англ.* М.: Мир, 1987. 542 с.
8. Огородников В. А., Сивак І. О., Сивак Р. І. Моделювання процесів немонотонної пластичної деформації. *Матеріали п'ятої міжнародної науково-технічної конференції «Контроль та управління в складових системах». Т. 1.* Вінниця: ВДТУ, 1999. С. 195–197.
9. Сивак І. О. Методика построения поверхности предельной пластичности. *Збірник тез доповідей міжнародної науково-технічної конференції.* Вінниця, 2001. С. 10–11.
10. Сорокин Г. М. Новые критерии повышения долговечности машин. *Вестник машиностроения, №5 (2008).* С. 19–23.
11. М. С. Дрозд, М. М. Маглин, Ю. И. Сидякин. *Инженерные расчеты упругопластической контактной деформации.* М.: Машиностроение, 1986. 224 с.
12. Прюмер Р. *Обработка порошковых материалов взрывом.* М.: Мир, 1990. 128 с.
13. Нигматулин Р. И., Холин Н. Н. Запаздывание текучести и упрочнение при скоростном деформировании металлов. *Доклады АН СССР. Т. 209, No.1 (1973).* С. 58–61.
14. Нигматулин Р. И., Холин Н. Н. К модели упругопластической среды с дислокационной кинетикой пластического деформирования. *Механика твердого тела (МТТ), Известия АН СССР, No.4 (1974).*
15. Савченко Ю. В. Импульсное модифицирование вторичного лома гетерогенных твердых сплавов. *Збірник наукових праць НГУ. Вип. 52. Д.: НГУ, 2017. С. 264–272.*
16. Савченко Ю. В. Прогресивний буровий інструмент з високим ресурсом та властивостями. *Збірник наукових праць НГУ. Вип. 55. Д.: НГУ, 2018. С. 247–254.*
17. Покровский Г. И. *Взрыв. 4-е изд., перераб. и доп.* М.: Недра, 1980. 190 с.
18. Имшенецкий А. А., Андриенко А. М., Драгобецкий В. В. Определение параметров внешней нагрузки при штамповке взрывом. *Импульсная обработка металлов давлением: Темат. сборник научных трудов. Вып. 10.* Харьков: ХАИ, 1982. С. 21–31.
19. В. Д. Новиков, П. З. Луговой. *Подводные и прибрежные взрывы.* К.: Наук. думка, 1982. 136 с.
20. Захаренко И. Д. *Сварка металлов взрывом.* Минск: Наука и техника, 1990. 205 с.
21. Кузьменко В. И., Балакин В. Ф. *Решение на ЭВМ задач пластического деформирования: Справочник.* К.: Техніка, 1990. 136 с.
22. Вдовин С. И. *Методы расчета и проектирования на ЭВМ процессов штамповки листовых и профильных заготовок.* М.: Машиностроение, 1988. 160 с.
23. Годунов С. К., Рябенский В. С. *Введение в теорию разностных схем.* М.: Физматгиз, 1962. 340 с.
24. Рихтмайер Р. Д. *Разностные методы решения краевых задач.* М.: Иностранная литература, 1972. 420 с.
25. А. В. Крупин, В. Я. Соловьев, Г. С. Попов, М. Р. Костев. *Обработка металлов взрывом.* М.: Металлургия, 1991. 495 с.
26. Дерибас А. А. *Физика упрочнения и сварки взрывом.* Новосибирск: Наука, 1980. 220 с.
27. Эпштейн Г. Н. *Строение металлов, деформированных взрывом.* М.: Металлургия, 1980. 256 с.

#### References (transliterated)

1. Dragobetskii V. V. Primenenie vzryvotermicheskogo uprochneniya v processah impul'snoj obrabotki [The use of explosive hardening in pulsed processing]. *Sbornik nauchnykh trudov* [Collection of scientific papers] no. 15. Alchevsk, DGMI Publ. pp. 188–195.
2. Dragobetskii V. V. Postanovka zadachi plasticheskogo deformirovaniya pri совмещении операций shtampovki i svarki vzryvom [The statement of the problem of plastic deformation when combining operations of stamping and explosion welding]. *Problemy sozdaniya novykh mashin i tehnologiy. Nauchnye trudy KGPU* [Problems of development of new machines and technologies. Scientific works of KSPU], no. 2. Kremenchuk, 1999. pp. 270–274.
3. *Impul'snaya obrabotka metallov davleniem* [Pulse metal forming]. *Sb. statej* [Collection of scientific papers] (V. K. Borisevich, ed.). Moscow, Mashinostroenie Publ., 1977. 144 p.
4. Borisevich V. K., Galiev Sh. U. Problema plasticheskogo deformirovaniya tonkolistovykh zagotovok vzryvom v zhidkosti [The problem of sheet blanks plastic deformation by explosion in a liquid]. *Impul'snaya obrabotka metallov davleniem. Mezhvuz. temat. sbornik nauchn. trudov* [Pulse metal forming. Interuniversity topics collection of scientific papers]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 1979, no. 8. pp. 3–14.
5. Borisevich V. K., Galiev Sh. U. Problema plasticheskogo deformirovaniya tonkolistovykh zagotovok vzryvom v zhidkosti [The problem of sheet blanks plastic deformation by explosion in a liquid]. *Impul'snaya obrabotka metallov davleniem. Mezhvuz. temat. sbornik nauchn. trudov* [Pulse metal forming. Interuniversity topics collection of scientific papers]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 1979, no. 8. pp. 3–14.
6. Majboroda V. P., Kravchuk A. S., Homin N. N. *Skorostnoe deformirovanie konstrukcionnykh materialov* [High-speed deformation of structural materials]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1986. 264 p.
7. Washizu K., ed. *Variational methods in elasticity and plasticity.* Oxford, New York, Toronto, Sydney, Paris, Frankfurt, Pergamon Press, 1982, 542 p. (Rus. ed.: Washizu K., ed. *Variacionnye metody v teorii uprugosti i plastichnosti.* Moscow, Mir Publ., 1987. 542 p.).
8. Ogorodnikov V. A., Syvak I. O., Syvak R. I. Modeljivannia procesiv nemonotonnoi plastichnoii deformacii [Modeling of processes of nonmonotonic plastic deformation]. *Materijali pjatoji mizhnarodnoji nauково-tehничnoji konferencii «Kontrol' ta upravlinnja v skladovykh sistemah». T. 1.* [Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Scientific and Technical Conference "Control and Management in



- Compound Systems". Vol. 1]. Vinnytsya, VNTU Publ., 1999. pp. 195–197.
9. Syvak I. O. Metodika postroenija poverhnosti predel'noj plastichnosti [The method of constructing the surface of ultimate ductility]. *Zbirnyk tez dopovidej mizhnarodnoi naukovno-tehnichnoi konferencii* [Proceedings of the International Scientific and Technical Conference]. Vinnytsya, 2001. pp. 10–11.
  10. Sorokin G. M. Novye kriterii povyshenija dolgovechnosti mashin [New criteria for increasing machine durability]. *Vestnik mashinostroenija* [Engineering Bulletin, no. 5], 2008. pp. 19–23.
  11. M. S. Drozd, M. M. Matlin, Ju. I. Sidjakin. Inzhenernye raschety uprugoplasticheskoj kontaktojnogoj deformacii [Engineering calculations of elastoplastic contact deformation]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1986. 224 p.
  12. Prummer R. *Explosivverdichtung pulvriger Substanzen: Grundlagen, Verfahren, Ergebnisse*. Berlin; Heidelberg; New York; London; Paris; Tokyo: Springer, 1987, 101 p. (Rus. ed.: Prummer R.. Obrabotka poroshkovyh materialov vzryvom. Moscow, Mir Publ., 1990. 128 p.).
  13. Нигматулин Р. И., Холин Н. Н. Zapazdyvanie tekuchesti i uprochnenie pri skorostnom deformirovanii metallov [Fluidity delay and hardening during rapid deformation of metals]. *Doklady AN SSSR*. 1973, vol. 209, no. 1., pp. 58–61.
  14. Nigmatulin R. I., Holin N. N. K modeli uprugo-plasticheskoj sredy s dislokacionnoj kinetikoju plasticheskogo deformirovanija [To a model of an elastic-plastic medium with dislocation kinetics of plastic deformation]. *Mehanika tverdogo tela (MTT)* [Mechanics of rigid body], *Izvestija AN SSSR*. 1974, no. 4.
  15. Savchenko Ju. V. Impul'snoe modifitsirovanie vtorichnogo loma geterogennyh tvjordyh splavov [Pulse modification of recycled scrap of heterogeneous hard alloys]. *Zbirnyk naukovyh prac' NGU* [Collection of scientific papers of NGU]. Dnipro, NGU Publ., 2017, no. 52, pp. 264–272.
  16. Savchenko Ju. V. Progresyvnij burovij instrument z vysokym resursom ta vlastyvostiamy [A progressive drilling tool with high resource and properties]. *Zbirnyk naukovyh prac' NGU* [Collection of scientific papers of NGU]. Dnipro, NGU Publ., 2018, no. 55, pp. 247–254.
  17. Pokrovskij G. I. *Vzryv. 4-e izd., pererab. i dop.* [Explosion. 4th ed., Rev. and add.]. Moscow: Nedra Publ., 1980. 190 p.
  18. Imsheneckij A. A., Andrienko A. M., Dragobetskij V. V. Opredelenie parametrov vneshnej nagruzki pri shtampovke vzryvom [Determination of external load parameters during stamping by explosion]. *Impul'snaja obrabotka metallov davleniem: Temat. sbornik nauchnyh trudov* [Pulse metal forming: Thematic collection of scientific papers]. Kharkov, KhAI Publ., 1982, no. 10, pp. 21–31.
  19. Novikov V. D., Lugovoj P. Z.. *Podvodnye i pribrezhnye vzryvy* [Underwater and coastal explosions]. Kyiv, Nauk. dumka Publ., 1982, 136 p.
  20. Zaharenko I. D. *Svarka metallov vzryvom* [Explosion welding of metals.]. Minsk, Nauka i tehnika Publ., 1990, 205 p.
  21. Kuz'menko V. I., Balakin V. F. *Reshenie na EVM zadach plasticheskogo deformirovanija: Spravochnik* [Computer Aided Solution of Plastic Deformation Problems: Reference book]. Kyiv, Tehnika Publ., 1990, 136 p.
  22. Vdovin S. I. *Metody rascheta i proektirovanija na EVM processov shtampovki listovyh i profil'nyh zagotovok* [Methods of calculation and computer design of stamping processes for sheet and profile blanks]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1988, 160 p.
  23. Godunov S. K., Rjaben'kij V. S. *Vvedenie v teoriju raznostnyh shem* [Introduction to the theory of difference schemes]. Moscow, Fizmatgiz Publ., 1962, 340 p.
  24. Richtmyer R. D., Morton K. W. *Difference methods for initial-value problems, 2nd Edition*. New York: Wiley-Interscience, 1967, 420 p. (Rus. ed.: Richtmyer R. D. Raznostnye metody reshenija kraevykh zadach. Moscow, Inostrannaja literature Publ., 1960. 420 p.).
  25. Krupin A. V., Solov'ev V. Ja., Popov G. S., Kostev M. R. *Obrabotka metallov vzryvom* [Explosive processing of metals]. Moscow, Metallurgija Publ., 1991. 495 p.
  26. Deribas A. A. *Fizika uprochnenija i svarki vzryvom* [Physics of hardening and explosion welding]. Novosibirsk: Nauka Publ., 1980. 220 p.
  27. Epshtejn G. N. *Stroenie metallov, deformirovannyh vzryvom* [The structure of metals deformed by the explosion]. Moscow, Metallurgija Publ., 1980. 256 p.

Надійшла (received) 06.11.2019

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

**Драгобецький Володимир Вячеславович (Драгобецький Владимир Вячеславович, Dragobetskyi Volodymyr)** – доктор технічних наук, професор, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, завідувач кафедри «Технології машинобудування»; м. Кременчук, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9637-3079>; e-mail: [vldrag@kdu.edu.ua](mailto:vldrag@kdu.edu.ua)

**Шлик Сергій Вікторович (Шлык Сергей Викторович, Shlyk Sergii)** – кандидат технічних наук, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, доцент кафедри «Технології машинобудування»; м. Кременчук, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9422-1637>; e-mail: [svshlyk@gmail.com](mailto:svshlyk@gmail.com)

**Наумова Олена Олександрівна (Наумова Елена Александровна, Naumova Olena)** – Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, інженер кафедри «Технології машинобудування»; м. Кременчук, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7733-5971>; e-mail: [vldrag@kdu.edu.ua](mailto:vldrag@kdu.edu.ua)

**Кузев Ігор Олегович (Кузев Игорь Олегович, Kuziev Ihor)** – Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, асистент кафедри транспортних технологій; м. Кременчук, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3403-7069>; e-mail: [igor-kuzev@ukr.net](mailto:igor-kuzev@ukr.net)

**Молоштан Дмитро Васильович (Молоштан Дмитрий Васильевич, Moloshtan Dmytro)** – Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, аспірант кафедри «Технології машинобудування»; м. Кременчук, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8881-8541>; e-mail: [vldrag@kdu.edu.ua](mailto:vldrag@kdu.edu.ua)

УДК 621.785.5: 621.793.6

*I. V. KRUGLYAK***STUDY OF PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF DIFFUSION LAYERS OBTAINED USING COMPOSITE SATURATIVE ENVIRONMENTS**

Multicomponent diffusion saturation can increase the hardness and wear resistance, heat resistance and corrosion resistance of metals and alloys in various environments, due to the formation of phases of a complex composition and structure in the surface layer. The physicomaterial properties of diffusion layers obtained using composite saturating media are investigated.

Surface saturation of alloys simultaneously with two elements has an advantage over saturation with one element. It allows you to combine in the resulting coating the properties created by individual elements with the special properties of their compounds. Due to the fact that the elements that make up the saturating mixture have different diffusion coefficients in the alloy, and also have a mutual influence on the diffusion rate of each other, the choice of the composition of the charge in a complex process is a difficult task.

On the results, we can say mechanical stresses (in this case, the compressive residual stresses) affect the corrosion behavior of metals, due to the extraction of the structural material by the fact that the level of residual stresses in coatings obtained under composite saturating environments charge is higher. As a result, the probability of micro-bursting of passive oxide skins is reduced, resulting in an increase in corrosion resistance.

**Key words:** composite saturating environment, brass, diffusion, diffusion layers, titanium, aluminum, silicon, chromium.

*I. V. КРУГЛЯК***ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ДИФУЗІЙНИХ ШАРІВ, ОТРИМАНИХ З ВИКОРИСТАННЯМ КОМПОЗИЦІЙНИХ НАСИЧУЮЧИХ СЕРЕДОВИЩ**

Багатокомпонентним дифузійним насиченням можна підвищити твердість і зносостійкість, жаростійкість і корозійну стійкість металів і сплавів в різних середовищах, внаслідок утворення в поверхневому шарі фаз складного складу і будови. В роботі досліджені фізико-механічні властивості дифузійних шарів, отриманих з використанням композиційних насичуючих середовищ. Поверхнєве насичення сплавів одночасно двома елементами має перевагу в порівнянні з насиченням одним елементом. Воно дозволяє поєднувати в одержуваному покритті властивості, створені окремими елементами з особливими властивостями їх сполук. Внаслідок того, що елементи, що входять до складу насичуючої суміші, володіють різними коефіцієнтами дифузії в сплаві, а також надають взаємний вплив на швидкість дифузії один одного, вибір складу шихти при комплексному процесі є складним завданням. За результатами можна сказати, що механічні напруження (в даному випадку стискають залишкові напруження) впливають на корозійне поведінку металів, обумовлене отриманням конструкційний матеріал тим, що рівень залишкових напружень в покриттях, отриманих в композитних насичують середовищах вище. В результаті ймовірність мікрориву пасивних оксидних оболонок зменшується, що призводить до збільшення корозійної стійкості.

**Ключові слова:** композиційні насичуючі середовища, латунь, дифузія, дифузійні шари, титан, алюміній, кремній, хром.

*I. V. КРУГЛЯК***ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ДИФУЗИОННЫХ СЛОЕВ, ПОЛУЧЕННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМПОЗИЦИОННЫХ НАСЫЩАЮЩИХ СРЕД**

Многокомпонентным диффузионным насыщением можно повысить твердость и износостойкость, жаростойкость и коррозионную стойкость металлов и сплавов в различных средах, вследствие образования в поверхностном слое фаз сложного состава и строения. В работе исследованы физико-механические свойства диффузионных слоев, полученных с использованием композиционных насыщающих сред. Поверхностное насыщение сплавов одновременно двумя элементами имеет преимущество по сравнению с насыщением одним элементом. Оно позволяет сочетать в получаемом покрытии свойства, создаваемые отдельными элементами с особыми свойствами их соединений. Вследствие того, что элементы, входящие в состав насыщающей смеси, обладают разными коэффициентами диффузии в сплаве, а также оказывают взаимное влияние на скорость диффузии друг друга, выбор состава шихты при комплексном процессе является сложной задачей. По результатам можно сказать, что механические напряжения (в данном случае сжимающие остаточные напряжения) влияют на коррозионное поведение металлов, обусловленное извлечением конструкционного материала тем, что уровень остаточных напряжений в покрытиях, полученных в композитных насыщающих средах выше. В результате вероятность микровзрыва пассивных оксидных оболочек уменьшается, что приводит к увеличению коррозионной стойкости.

**Ключевые слова:** композиционные насыщающие среды, латунь, диффузия, диффузные слои, титан, алюминий, кремний, хром.

**Introduction.** Composition is the main parameter that determines the choice of method and technological characteristics of the coating process, structure, layer thickness and the performance of structural materials with diffusion layers.

The grounds for choosing the composition of a single or multicomponent layer are phenomenological provisions on the choice of coating from the point of view of assessing the influence of its composition on strength characteristics, as well as an assessment of the main criteria that should be improved (increasing heat resistance, resistance in aggressive environments, etc.), and which should be studied with the establishment of the laws of complex saturation [1].

Multicomponent diffusion saturation can increase the hardness and wear resistance, heat resistance and corrosion resistance of metals and alloys in various environments, due to the formation of phases of a complex composition and structure in the surface layer.

The choice of the composition of complex coatings and technologies for their preparation is a complex material science problem.

Diffusion saturation simultaneously with several elements in most cases is more effective. When combined with aluminum and silicon, the resistance is higher than when saturated with each of these elements.

The results of studies with simultaneous saturation with two elements depend on many factors and, above all,

on their content in the saturating mixture, temperature and duration of the process [2, 3].

#### **Analysis of recent research and publications.**

Surface saturation of alloys simultaneously with two elements has an advantage over saturation with one element. It allows you to combine in the resulting coating the properties created by individual elements with the special properties of their compounds. Due to the fact that the elements that make up the saturating mixture have different diffusion coefficients in the alloy, and also have a mutual influence on the diffusion rate of each other, the choice of the composition of the charge in a complex process is a difficult task.

Complex coatings significantly improve the surface properties of parts [4].

Establishing the general laws of structure formation of a diffusion layer during diffusion saturation with two or more elements would make it possible to predict the properties of the surface layer and designate rational CHT modes.

The simultaneous or sequential saturation of metals and alloys with several elements has so far not been sufficiently studied, especially with respect to the composition of saturating media at the same time, and sequential saturation has not been established in which saturation is necessary to ensure high performance properties. It is not completely clear which method of saturation, simultaneous or sequential, should be preferred, although the simultaneous method greatly simplifies the process of chemical-thermal treatment [5]. A significant role in the formation of coatings is played by process factors [6].

The rate of formation, the kinetics of layer growth, its structure and properties are largely determined by the process temperature, saturation time, and diffusion parameters of saturating components and significantly depend on the chemical composition, structure and properties of the material itself.

The speed of the diffusion saturation process is determined by the speed of reaching a given concentration of the diffusing element on the surface and reaching the desired depth of the diffusion layer. The speed of the process of diffusion metallization and chemical-thermal treatment is limited by the slowest stage – diffusion, *ceteris paribus*.

Raising the temperature is the most effective way to accelerate diffusion saturation, since the diffusion parameters and rate constants of chemical reactions are associated with temperature, an exponential dependence [7].

Improving the physicochemical properties of aluminized and boronized parts is possible using composite saturating media, which include an exothermic chromium component (ECC). The purpose of this work is to obtain diffusion layers using composite saturating environments based on aluminum and boron using ECC.

**Presenting main material.** Aluminosiliconization is of interest from the point of view of studying the formation of a diffusion layer at two-component saturation. Aluminum and silicon do not form chemical compounds between themselves and there is almost no mutual solubility in the solid state. Therefore, surface doping

excludes the interaction of elements in the saturating mixture, which creates favorable conditions for their diffusion into the alloy. As a result of the interaction of these elements with alloy components, complex aluminides and silicides are formed, which helps to increase the protective properties of the layer [5].

Diffusion saturation of steel with two elements (Al + Si) under conditions of fast electric heating makes it possible to significantly reduce the duration of the process, as well as to obtain better scale resistance than with diffusion saturation with one element. The process of diffusion saturation of iron and steel with aluminum and silicon is significantly accelerated in the case of electric heating.

The processes of two-component surface alloying with chromium and silicon, as well as titanium and silicon, have a technological advantage over the siliconization process. Even small additions of chromium and titanium to the saturating mixture during siliconization leads to a significant improvement in surface quality, a decrease in the porosity and brittleness of the layer, and an improvement in its adhesion to the base metal. The addition of an inert additive to the saturating mixture in an amount of 35% or more also favorably affects the surface quality of the alloy after saturation [5]. The simultaneous saturation of steel with chromium and silicon allows one to obtain diffusion layers with a complex of valuable physicochemical properties. They are more acid-resistant and scale-resistant than chrome-plated, and more plastic than siliconized.

Chromosiliconization and chromoalutization of steels increases their wear resistance, erosion and cavitation resistance, resistance to gas and electrochemical corrosion [8].

The processes of two-component surface alloying with chromium and silicon, as well as titanium and silicon, have a technological advantage over the siliconization process. Even small additions of chromium and titanium to the saturating mixture during siliconization leads to a significant improvement in surface quality, a decrease in the porosity and brittleness of the layer, and an improvement in its adhesion to the base metal. The addition of an inert additive to the saturating mixture in an amount of 35% or more also favorably affects the surface quality of the alloy after saturation. The simultaneous saturation of steel with chromium and silicon allows one to obtain diffusion layers with a complex of valuable physicochemical properties. They are more acid-resistant and scale-resistant than chrome-plated, and more plastic than siliconization.

The chromosiliconization process is carried out from powders, from pastes (coatings) [8] are used for large-sized products and, if necessary, local hardening, in melts and electrolysis with additives of a reducing agent. Gas chromosiliconization can be carried out in a chlorine medium [9].

Borosiliconization is carried out both by simultaneous and sequential saturation of metals and alloys with boron and silicon. It is used to increase wear resistance, less often heat resistance and corrosion resistance.

Carbon steel borosiliconization is carried out in powder media by gas contact method. Titanosiliconization is used to increase surface hardness, resistance to high-temperature gas corrosion and corrosion resistance in aggressive environments. The process is carried out by saturation from powder mixtures by the contact method.

Tungsten siliconization increases the wear resistance of steels under conditions of dry sliding friction and abrasive wear. However, this effect, due to the small layer thickness, is relatively small. The layers are obtained by liquid (electrolysis and without electrolysis) and metallothermal methods [8].

Obtaining diffusion layers on the steel surface using composite saturating media leads to an increase in the operational characteristics of machine parts. So aluminosiliconized layers are used to increase the heat resistance and less often the corrosion resistance of parts. It is carried out from the gas phase in powders of silicon-aluminum containing substances, from pastes and suspensions using various heating methods, from the liquid phase in melts based on aluminum and other metals, and from the gas phase.

Chromoanalysis is used mainly to increase the scale and erosion resistance of parts. It is carried out from the vapor phase, the gas phase from the powders. This method significantly increases the heat resistance of carbon and alloy steel. Titanization is used mainly to increase heat resistance, corrosion resistance and wear resistance, it is carried out by the aluminothermy method of powders.

Borochroming is the process of improving the physicochemical characteristics of boride layers with high brittleness, insufficient corrosion resistance and heat resistance. Bicomponent layers are obtained by galvanometric, diffusion, combination of galvanic and diffusion methods, and surfacing [10-13].

The choice of materials is due to the possibility of studying mass steel, due to their relatively low cost, as well

as the need to study the effect of carbon on the formation of the layer. As saturation activators, ammonium chloride, ammonium iodide, ammonium fluoride, and iodine were used.

Composite saturating environments (CSE) included ECC, powders: silicon, chromium, titanium, boron, aluminum and copper. The diffusion saturation process was carried out on the developed experimental industrial plant DDTU-11.

The microstructure of the structural materials with coatings based on aluminum and boron was studied on transverse sections using a Neophot – 2 microscope with an increase of x50–500. In the preparation of transverse sections, in order to prevent the destruction of coatings during processing, the samples were fixed in special clamps (steel clamps) with gaskets made of copper or aluminum foil. Processing of transverse sections was carried out according to the standard procedure [14].

After grinding is completed, subtle risks remain on the surface of the grinding. For the final leveling of the surface, the polished section was polished to a mirror shine on the cloth in the presence of an aqueous emulsion of chromium oxide (III). To show the microstructure of coatings obtained on technical iron and steels, we used a 5% alcohol solution of picric acid in ethanol [14].

Studies of the layer thickness were carried out on cylindrical samples with a diameter of 10–15 mm. The layer thickness was determined on transverse sections using a PMT – 3M instrument or a Neophot – 32 metallographic microscopes.

The study of microhardness by the thickness of the layer was measured on a PMT – 3m [15–16] by pressing a Vickers diamond tip into the material with a square base of a tetrahedral pyramid with an angle at apex 136°, which ensures a geometric and mechanical similarity of the print as it deepens indenter under the action of loading. We also used an automated microhardness-meter 402, which allows you to transfer images of automatic measurement of the fingerprint to the screen of a personal computer monitor. The surface of the measured sample before grinding microhardness was ground and polished.

The compositions of saturating environments and the characteristics of the diffusion layers formed on bra are presented in Table 1.

Table 1 The effect of the composition of the powder saturating medium on the thickness and microhardness of the formed on steel 45 at  $t = 1000$  °C for 2 hours.

№	Composition saturating environments,% wt.
1	22 % ЭХГ + 15% Si + 15 % Al + 2 % NH <sub>4</sub> Cl + 2 % NaF + 2 % Cu + 32 % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
2	23 % ЭХГ + 17% Al + 15 % Cr + 2 % NH <sub>4</sub> Cl + 3 % NaF + 2 % Cu + 38 % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
3	25 % ЭХГ + 27% Al + 18 % Ti + 3 % NH <sub>4</sub> Cl + 3 % NaF + 2 % Cu + 22 % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
4	22 % ЭХГ + 15% B + 17%Si + 3 % NH <sub>4</sub> Cl + 2% I + 2 % Cu + 49 % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
5	24 % ЭХГ + 17% Cr + 20 % B + 3% NH <sub>4</sub> F + 2 % NH <sub>4</sub> I + 2 % Cu + 32 % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>

Manganese-iron brass, designed for casting simple configuration of critical parts and armature of marine shipbuilding, operating at temperatures up to 300 °C.

Brasses intensively corrode under the influence of mineral acids (nitric, hydrochloric). Sulfuric acid acts on brass much slower, but in the presence of oxidants {K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>, Fe<sub>2</sub>(S<sub>0</sub><sub>4</sub>)<sub>3</sub>}, the corrosion rate increases by two orders of magnitude. Bars are sufficiently stable in solutions of alkalis (with the exception of ammonia) and in concentrated solutions of neutral salts.

Hydrogen sulfide provides strong corrosive action on brass. At the same time, brass with high zinc content (more than 30%) is more stable in the hydrogen sulfide medium than brass with low zinc content. For corrosion resistance research, corrosive materials are used that imitate the intended applications:

- pumps for acid transfer in the production of titanium;
- bearing units on objects of special equipment in rocket space and defense industries;

– for the manufacture of simple configuration of parts for responsible purposes and armature of marine shipbuilding, operating at temperatures up to 300 °C of massive parts, propellers and their blades.

To enhance the corrosion resistance of brass, requires a protective coating containing elements that form passive films. In this case, upon reaching the potential of ionic passivation, oxide films of the composition: Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub> which protect the metal from destruction, are formed.

When tested in a 30% hydrochloric acid aqueous solution, covering doped with silicon and titanium have the best resistance. The metallographic analysis shows that the protective coatings in all samples were uniformly corroded to a small depth, therefore, it is advisable to use covering doped with silicon to work in a 30% hydrochloric acid solution, which, besides good corrosion resistance, also has a high wear resistance.

**Conclusions.** The results obtained can be explained by the formation of surfaces on the doped phases leading to surface passivation in aggressive media. It is also possible to suppose the effect of electrochemical braking of anodic dissolution of metals at a higher concentration of alloying elements compared to coatings obtained under isothermal conditions.

The growth of corrosion resistance is indicated by the surface morphology after obtaining doped protective coatings, which indicates the absence of micro-burglary.

It is known that the mechanical stresses (in this case, the compressive residual stresses) affect the corrosion behavior of metals, due to the extraction of the structural material by the fact that the level of residual stresses in coatings obtained under composite saturating environments charge is higher. As a result, the probability of micro-bursting of passive oxide skins is reduced, resulting in an increase in corrosion resistance.

#### References (transliterated)

- Shatinsky V.F., Nesterenko A.I. Protective diffusion coatings. – Kiev: Naukova Dumka. – 1988. – P. 272.
- Zemskov G.V., Some features of simultaneous saturation with two elements. // Protective coatings on metals. – 1972. – Vol. 6. – P. 28 – 33.
- Zemskov G.V. and other. Patterns of diffusion saturation of alloys // Metallurgy and heat treatment of metals. – 1967. – No. 4. – P. 41 – 43.
- Umansky V.B., Kostenko A.A., Hudik Yu.G. Hardening of parts of metallurgical equipment. Moscow : Metallurgy. – 1991. – P. 17.
- Zemskov G.V., Kogan R.L. Multicomponent diffusion saturation of metals and alloys. Moscow: Metallurgy, 1978. – P. 208.
- Gnesin G.G. and other wear-resistant coatings on the tool// Powder metallurgy. – 1996. – No. 9. – P. 17 – 28.
- Filonenko B.A. Complex diffusion coatings. Moscow: Machine-building. – 1981. – P. 136.
- Metalworking: Pidruchnik / O.M. Bialik, V.S. Chernenko, V.M. Pisarenko, Yu.N. Moskalenko – 2nd edition. – Vidavnitsvo Politehnika, 2002. – P. 384.
- Gilgur D.S., Bereklblum A.S., Tertokovsky L.N. // Metallurgy and heat treatment of metals. – 1966. – No. 10. – P. 52.
- Borisenok G.V., Vasiliev L.A., Voroshnin L.G. and other Chemical-thermal processing of metals and alloys. //Directory. Moscow: Metallurgy, 1981. – P. 424.
- Sereda B.P. Surface hardening of materials. / Sereda B.P., Kalinina N.E., Kruglyak I.V. Monograph, Zaporizhzhya: ZDIA, 2004. – 230 p.
- Surface hardening of structural materials using composite saturating media: Monograph / B.P. Sereda, I.V. Kruglyak, Yu.O. Belokon, D.O. Kruglyak, D.B. Sereda // Kamenskoe: Dniprovsky State Technical University, 2019. – 242 p.
- Surface Strengthening of Materials Working under the Conditions of Complex Exposure to Aggressive Substances Monograph / B.P. Sereda, L.P. Bannikov, S.T. Nesterenko, O.S. Haydaenko, I.V. Kruglyak, D.B. Sereda // Kamenskoe: Dniprovsky State Technical University, 2019. – 173 p.
- Hicks Ch. The basic principles of experimental design. Per. From English M.: Mir. – 1967. – 406 p.
- Kovalenko V. S. Metallographic reagents. Ref. Ed. – 3rd ed., Revised. and add. Moscow : Metallurgy. – 1981. – 120 p.
- GOST R 8.636-2007. Raster electronic microscopes. Calibration Procedure. – Moscow : Standartinform. – 2008. – 12 p.

#### Список літератури

- Шатинский В.Ф., Нестеренко А.И. Защитные диффузионные покрытия. Киев: «Наукова думка», 1988. – С. 272.
- Земсков Г.В., Некоторые особенности одновременного насыщения двумя элементами. //Защитные покрытия на металлах. – 1972. – Вып. 6. – С. 28 – 33.
- Земсков Г.В. и др. Закономерности диффузионного насыщения сплавов. //Металловедение и термическая обработка металлов. – 1967. – №4. – С. 41 – 43.
- Уманский В.Б., Костенко А.А., Худик Ю.Г. Упрочнение деталей металлургического оборудования. М.: Металлургия, 1991. – С. 17.
- Земсков Г.В., Коган Р.Л. Многокомпонентное диффузионное насыщение металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1978. – С. 208.
- Гнесин Г.Г. и др. Износостойкие покрытия на инструменте. // Порошковая металлургия. – 1996. -№ 9. – С. 17 – 28.
- Филоненко Б.А. Комплексные диффузионные покрытия. М.: Машиностроение, 1981. – С. 136.
- Металлознание: Підручник /О.М. Бялик, В.С. Черненко, В.М. Писаренко, Ю.Н. Москаленко – 2-ге вид. Перероб. І доп. – к/ ВЦ «Видавництво Політехніка», 2002. – С. 384.
- Гильгур Д.С., Берекблум А.С., Тертоковский Л.Н. //Металловедение и термическая обработка металлов. – 1966. – № 10. – С. 52.
- Борисенко Г.В., Васильев Л.А., Ворошнин Л.Г. и др. Химико-термическая обработка металлов и сплавов. //Справочник. М.: Металлургия, 1981. – С. 424.
- Середа Б.П. Поверхневе зміцнення матеріалів. /Середа Б.П., Калініна Н.Є., Кругляк І.В. Монографія, Запоріжжя : ЗДІА, 2004. – 230 с.
- Поверхневе зміцнення конструкційних матеріалів з використанням композиційних насичуючих середовищ: Монографія /Б.П. Середя, І.В. Кругляк, Белоконь, Д.О. Кругляк, Д.Б. Середя// Кам'янське: Дніпровський державний технічний університет, 2019. – 242 с.
- Поверхневе зміцнення матеріалів працюючих в умовах комплексного впливу агресивних речовин Монографія /Б.П. Середя, Л.П. Банніков, СВ. Нестеренко, О.С. Гайдаєнко, І.В. Кругляк, Д.Б. Середя// Кам'янське: Дніпровський державний технічний університет, 2019. – 173 с.
- Хикс Ч. Основные принципы планирования эксперимента: пер. с англ. М.: Мир, 1967. 406 с.
- Коваленко В. С. Металлографические реактивы. Справ. изд. – 3-е изд., перераб. и доп. М.:Металлургия, 1981. 120с.
- ГОСТ Р 8.636-2007. Микроскопы электронные растровые. Методика калибровки. – М.: Стандартинформ, 2008. – 12 с

Надійшла (received) 16.11.2019

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

**Кругляк Ірина Василівна (Кругляк Ирина Васильевна, Kruglyak Irina Vasil'evna)** – кандидат технічних наук, доцент, докторант, Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське



УДК.621.771.01

*О. П. МАКСИМЕНКО, Д. И. ЛОБОЙКО, Л. В. ПОСТОЛЬНИК***ИССЛЕДОВАНИЕ КОНТАКТНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ПРОКАТКЕ В РЕЖИМЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ТРЕНИЯ**

Результаты экспериментальных исследований, опубликованные в ряде отечественных и зарубежных источников, показывают, что процесс холодной прокатки с применением эффективных технологических смазок совершается устойчиво без частичных пробуксовок при однозонном скольжении металла в валках или даже при «отрицательном» опережении. С позиции современной теории такие условия прокатки трудно объяснить, так как она исходит из того, что предельные условия определяются равенством угла нейтрального сечения нулю.

Поэтому целью настоящей работы является изучение закономерностей процесса прокатки при однозонном скольжении полосы в очаге деформации и в частности исследование распределения контактных напряжений при прокатке в режиме гидродинамического трения. Проведенные нами опыты показывают, что, опережение существенно зависит от толщины смазочной пленки в контакте полосы с валками и при значительной величине ее прокатка протекает в условиях однозонного скольжения. Поэтому в теоретическом исследовании исходили из гидродинамического закона трения в очаге деформации. Учитывая, что закон Баруса не отражает реальной картины изменения вязкости смазки от давления из-за возможности перехода ее в твердое фазовое состояние, пришлось несколько изменить принятую модель. При этом исходили из равенства полных сил гидродинамического трения и трения скольжения. Подставляя эту модель в дифференциальное уравнение Кармана и решая его при известных граничных условиях рассчитывали эпюры контактных напряжений для трех случаев прокатки: при наличии опережения, при нулевом его значении и при однозонном скольжении металла в валках. В первом случае эпюры контактных напряжений существенно от известных не отличались. При прокатке с нулевым опережением кривая распределения нормального давления расположена существенно ниже по сравнению с первым случаем, но ни в одном сечении давление не было ниже среднего сопротивления деформации металла, что свидетельствовало об отсутствии нормальных продольных растягивающих напряжений. При прокатке с «отрицательным» опережением вблизи выхода металла из валков возникают вышеуказанные напряжения. Проверка на продольную устойчивость показала, что во всех трех случаях процесс совершается устойчиво без частичных пробуксовок. Важно отметить, что прокатка при нулевом опережении является энергетически выгодным процессом.

**Ключевые слова:** опережение, очаг деформации, трение, внутренние продольные силы, продольная устойчивость.

*О. П. МАКСИМЕНКО, Д. И. ЛОБОЙКО, Л. В. ПОСТОЛЬНИК***ДОСЛІДЖЕННЯ КОНТАКТНИХ НАПРУЖЕНЬ ПРИ ПРОКАТУВАННІ В РЕЖИМІ ГІДРОДИНАМІЧНОГО ТЕРТЯ**

Результати експериментальних досліджень, які опубліковані в ряді вітчизняних і зарубіжних джерел, показують, що процес холодного прокатування із застосуванням ефективних технологічних мастил відбувається стійко без часткових буксувань при однозонному ковзанні металу в валках або навіть при «від'ємному» випередженні. З позиції сучасної теорії такі умови прокатування важко пояснити, так як вона виходить з того, що граничні умови визначаються рівністю нулю кута нейтрального перетину.

Тому метою цієї роботи є вивчення закономірностей процесу прокатування при однозонному ковзанні штаби в осередку деформації і зокрема дослідження розподілу контактних напружень при прокатуванні в режимі гідродинамічного тертя. Проведені нами досліді показують, що, випередження істотно залежить від товщини мастильної плівки в контактні штаби з валками і при значній величині її прокатування протікає в умовах однозонного ковзання. Тому в теоретичному дослідженні виходили з гідродинамічного закону тертя в осередку деформації. Враховуючи, що закон Баруса не відображає реальної картини зміни в'язкості мастила від тиску через можливість переходу її в твердий фазовий стан, довелося дещо змінити прийняту модель. При цьому виходили з рівності повних сил гідродинамічного тертя і тертя ковзання. Підставляючи цю модель в диференціальне рівняння Кармана і вирішуючи його при відомих граничних умовах розраховували епюри контактних напружень для трьох випадків прокатування: при наявності випередження, при нульовому його значенні і при однозонному ковзанні металу в валках. У першому випадку епюри контактних напружень істотно від відомих не відрізнялися. При прокатуванні з нульовим випередженням крива розподілу нормального тиску розташована істотно нижче в порівнянні з першим випадком, але ні в одному перерізі тиск не був нижче за середній опір деформації металу, що свідчило про відсутність нормальних поздовжніх напружень, що розтягують. При прокатуванні з «від'ємним» випередженням поблизу виходу металу з валків виникають вищевказані напруження. Перевірка на поздовжню стійкість показала, що у всіх трьох випадках відбувається стійко без часткових буксувань. Важливо відзначити, що прокатування при нульовому випередженні є енергетично вигідним процесом.

**Ключові слова:** випередження, осередок деформації, тертя, внутрішні поздовжні сили, поздовжня стійкість.

*О. П. МАКСИМЕНКО, Д. И. ЛОБОЙКО, Л. В. ПОСТОЛЬНИК***INVESTIGATION OF CONTACT STRESSES WHILE ROLLING IN HYDRODYNAMIC FRICTION**

The results of experimental studies published in a number of domestic and foreign sources show that the cold rolling process using effective process lubricants is stable without partial slippage during single-zone sliding of metal in the rolls or even with a "reverse" forward slip. From the point of view of modern theory, such rolling conditions are difficult to explain, so how does it proceed from the fact that the limiting conditions are determined by the equality of the angle of the neutral cross section to zero.

Therefore, the aim of this work is to study the patterns of the rolling process during single-zone strip sliding in the deformation zone and, in particular, to study the distribution of contact stresses during rolling in the hydrodynamic friction mode. Our experiments show that, advancing essentially depends on the thickness of the lubricating film in contact with the strip and the rolls when a significant value of its rolling occurs in single-zone sliding. Therefore, in a theoretical study, we proceeded from the hydrodynamic law of friction in the deformation zone. Given that the Barus law does not reflect the real picture of changes in the viscosity of the lubricant from pressure due to the possibility of its transition to a solid phase state, it was necessary to slightly change the adopted model. In this case, we proceeded from the equality of the total forces of hydrodynamic friction and sliding friction. Substituting this model into the Karman differential equation and solving it under known boundary conditions, contact stress diagrams were calculated for three rolling cases: in the presence of forward slip, at its zero value and with single-zone metal slip in the rolls. In the first case, the contact stress diagrams did not differ significantly from the known ones. When rolling with zero forward slip, the normal pressure distribution curve is significantly lower compared to the first case, but for one section the pressure was not lower than the average metal deformation resistance, which indicated the absence of normal longitudinal tensile stresses. When rolling with a "negative" of forward slip near the exit of the metal from the rolls, the above stresses occur. A check for longitudinal stability showed that in all three cases the process is performed stably without partial slippage. It is important to note that rolling at zero forward slip is an energetically profitable process.

**Keywords:** forward slip, deformation zone, friction, internal longitudinal forces, longitudinal stability.

**Введение.** Экспериментальные исследования, возможность осуществления устойчивого процесса приведенные в работах [1, 2 и др.], показывают холодной прокатки с технологической смазкой при

однозонном скольжении металла в валках или даже с «отрицательным» опережением. В этом случае, теоретически установленное, предельное условие прокатки  $\gamma = 0$  ( $\gamma$  – нейтральный угол) не выполняется.

Исследователи объясняют устойчивость такого процесса особенностями трения в очаге деформации, связанными с зависимостью коэффициента трения от скорости скольжения, предполагая, что в этом контакте соблюдается закон Ньютона. Заметим что гидродинамический режим трения возможен не только при  $R_{ZB} + R_{ZII} < \xi_1$  ( $R_{ZB}$  и  $R_{ZII}$  – средняя высота микронеровностей валка и полосы;  $\xi_1$  – толщина слоя смазки на выходе из очага деформации), но и при равенстве приведенных выше величин или даже в тех случаях, когда сумма микронеровностей несколько превышает значение  $\xi_1$  [3].

**Постановка задачи.** С целью более детального изучения закономерностей прокатки при однозонном скольжении металла в валках проанализируем изменение контактных напряжений в условиях жидкостного трения при тяжело нагруженном контакте. Механики такой режим называют контактно-гидродинамическим [4]. Он определяется зависимостью динамической вязкости смазки от давления и влиянием упругой деформации полосы и валков в гидродинамическом клине, расположенном в предеокаговой зоне, на толщину слоя смазки.

**Результаты работы.** Предварительно обратим внимание на то, что переход к однозонному скольжению зависит от толщины слоя смазки в очаге деформации. В связи с отмеченным приведем результаты эксперимента, в котором исследовали влияние угла захвата на опережение и толщину смазочной пленки. Опыты проводили на лабораторном стане дуо в полированных валках диаметром 190 мм при скорости прокатки  $V_b = 0,35$  м/с, образцами служили медные полосы поперечными разрезами  $h_0 \times b_0 = 5 \times 60$  мм. В качестве технологической смазки применяли касторовое масло. Толщину смазочной пленки в контакте валков и полосы измеряли капельным методом [5], опережение  $S$  определяли по керновым отпечаткам. Результаты опытов приведены на рис. 1.

Как видно, при значительной толщине слоя смазки ( $\xi_1 \geq 1,2$  мкм) процесс прокатки совершается устойчиво без частичных пробуксовок при однозонном скольжении металла в валках ( $S < 0$ ). Казалось бы, при опережении равно нулю запас сил трения исчерпан и дальнейшее увеличение угла захвата должно привести к нарушению равновесия сил в очаге деформации и к пробуксовке полосы в валках. Однако с увеличением  $\alpha$  возрастает скольжение металла в валках и уменьшается толщина смазочной пленки в очаге деформации, что в соответствии с законом Ньютона, приводит к росту сил трения в контакте металла с валками и стабилизации процесса

прокатки, но при  $S < 0$ . Поэтому при холодной прокатке с эффективными (вязкими) технологическими смазками, при значительной толщине масляной пленки возможен процесс с однозонным скольжением.

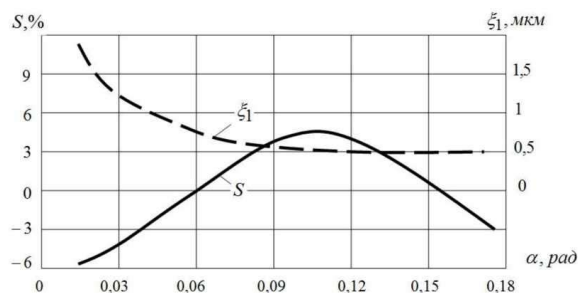


Рис. 1 – Зависимость толщины смазочной пленки и опережения от угла захвата

Закон Баруса [6-8] не отражает реальной картины изменения вязкости смазки при высоких давлениях в очаге деформации из-за возможности ее перехода в твердое фазовое состояние. Поэтому при теоретическом анализе пришлось усреднить значение динамической вязкости, предполагая, что полные силы гидродинамического трения и трения скольжения равны между собой. Тогда:

$$\eta_{cp} \frac{v_{ск.ср.}}{\xi_{cp}} F = f_{cp} P_{cp} F, \quad (1)$$

где  $\eta_{cp}$  – среднее по очагу деформации значение динамической вязкости;

$v_{ск.ср.}$  – средняя скорость скольжения по очагу;  $\xi_{cp}$

– средняя толщина смазочной пленки;

$f_{cp}$  – среднее значение коэффициента трения при установившемся процессе прокатки;

$P_{cp}$  – среднее давление по очагу деформации;

$F$  – площадь контакта металла с валками.

В этом случае гидродинамическая модель трения в очаге деформации приобретает вид:

$$t_x = \frac{f_{cp} P_{cp} \xi_{cp}}{v_{ск.ср.}} \cdot \frac{v_b - v_x}{\xi_x}. \quad (2)$$

где  $v_x$  – текущее значение скорости поверхности раската;

$v_b$  – линейная скорость вращения валка;

$\xi_x$  – текущее значение толщины слоя смазки.

Учитывая, что толщина слоя смазки в реальных условиях холодной прокатки слабо изменяется по очагу деформации, в первом приближении можем принять  $\xi_x \approx \xi_{cp}$ . Тогда, модель трения принимает вид:

$$t_x = \frac{f_{cp} P_{cp}}{v_{ск.ср.}} \cdot (v_b - v_x). \quad (3)$$

Заметим, что среднее значение скорости скольжения определяли по известной формуле:

$$v_{\text{ск.ср.}} = \frac{v_b \cdot \Delta h}{3 \cdot h_1}.$$

Подставляя выражение (3) в дифференциальное уравнение равновесия Т. Кармана и решив его при известном граничном условии на входе в очаг деформации, получаем уравнение распределения давления в безразмерном виде:

$$\frac{p_x}{\beta \sigma_x} = 1 + \ln \frac{h_x}{h_0} - A \sqrt{\frac{R}{h_1}} \left\{ \begin{array}{l} (1-S) \left[ \arctg \sqrt{\frac{h_x - h_1}{h_1}} - \arctg \sqrt{\frac{\Delta h}{h_1}} \right] - \\ -(S+1) \left[ \sqrt{\frac{(h_x - h_1) h_1}{h_x}} - \sqrt{\frac{\Delta h \cdot h_1}{h_0}} \right] \end{array} \right\}. \quad (4)$$

$$A = \frac{f_{\text{ср}} P_{\text{ср}} 3 h_1}{\beta \sigma_T \Delta h}$$

где  $h_0$ ;  $h_1$  и  $h_x$  – начальное и конечное значение толщины полосы, а также его текущее значение;

$R$  – радиус валков;

$S$  – опережение;

$\Delta h$  – абсолютное обжатие полосы;

$\beta \sigma_T$  – вынужденный предел текучести.

Граничное условие на выходе полосы из валков используем для расчета опережения:

$$S = \frac{\arctg \sqrt{\frac{\Delta h}{h_1}} - \sqrt{\frac{\Delta h \cdot h_1}{h_0}} - \frac{1}{A} \sqrt{\frac{h_1}{R}} \cdot \ln \frac{h_0}{h_1}}{\arctg \sqrt{\frac{\Delta h}{h_1}} + \sqrt{\frac{\Delta h \cdot h_1}{h_0}}}. \quad (5)$$

Определяя по известным формулам [9, 10 и др.] значение  $f_{\text{ср}}$ , из выражения (5) находили опережение  $S$  и рассчитывали эпюры контактных напряжений. Требуемые значения  $A$  определяли с использованием метода последовательных приближений. На рис. 2 приведены эпюры контактных напряжений для трех случаев прокатки: при наличии опережения  $S = 4,1\%$ , при нулевом его значении и при однозонном скольжении металла в валках ( $S = -1,8\%$ ). Моделирование указанных случаев прокатки

обеспечивали изменением коэффициента трения ( $f_{\text{ср}} = 0,0585$ ;  $0,0323$ ; и  $0,0281$ ) и соответственно при следующих значениях  $v_{\text{ср.ск.}}/V_B$ :  $0,082$ ;  $0,098$  и  $0,106$ . Остальные параметры прокатки удерживали на постоянном уровне:  $h_0/h_1 = 1,245$ ;  $\alpha = 0,047$  рад;  $R/h_0 = 89,9$ .

При коэффициенте трения несколько превышающем угол захвата получены эпюры контактных напряжений характерные для обычного процесса (кривые 1): куполообразное распределение давления с максимумом, несколько смещённым к плоскости входа металла в валки относительно нейтрального сечения. В очаге деформации имеет место развитая зона опережения. При  $f_{\text{ср}} = 0,0323$ , когда опережение равно нулю, кривая нормального давления (линия 2) расположена существенно ниже по сравнению с предыдущей. Максимум этой эпюры еще более смещен к плоскости входа в очаг деформации, а удельные силы трения принимают нулевое значение в сечении выхода металла из валков. Важно отметить, что по всей длине очага деформации безразмерное давление  $\frac{p_x}{\beta \sigma_T} \geq 1$ . Последнее свидетельствует о том,

что при прокатке с нулевым опережением и гидродинамическом режиме трения в зоне пластической деформации продольные нормальные напряжения  $\sigma_x$  являются сжимающими. При прокатке с «отрицательным» опережением ( $f_{\text{ср}} = 0,0281$ , кривые 3) вблизи выхода металла из валков эти напряжения становятся растягивающими, а отношение  $\frac{p_x}{\beta \sigma_T} < 1$ . Заметим, что во всех приведенных на рис. 2 случаях прокатки относительное безразмерное среднее давление  $\frac{P_{\text{ср}}}{\beta \sigma_T}$  больше единицы. Последнее связано с тем, что при рассматриваемых условиях трения разность напряжений на значительной части входной зоны является положительной (рис. 3).

$$q_x = \frac{t_x \cos \varphi - p_x \sin \varphi}{\beta \sigma_T}. \quad (6)$$

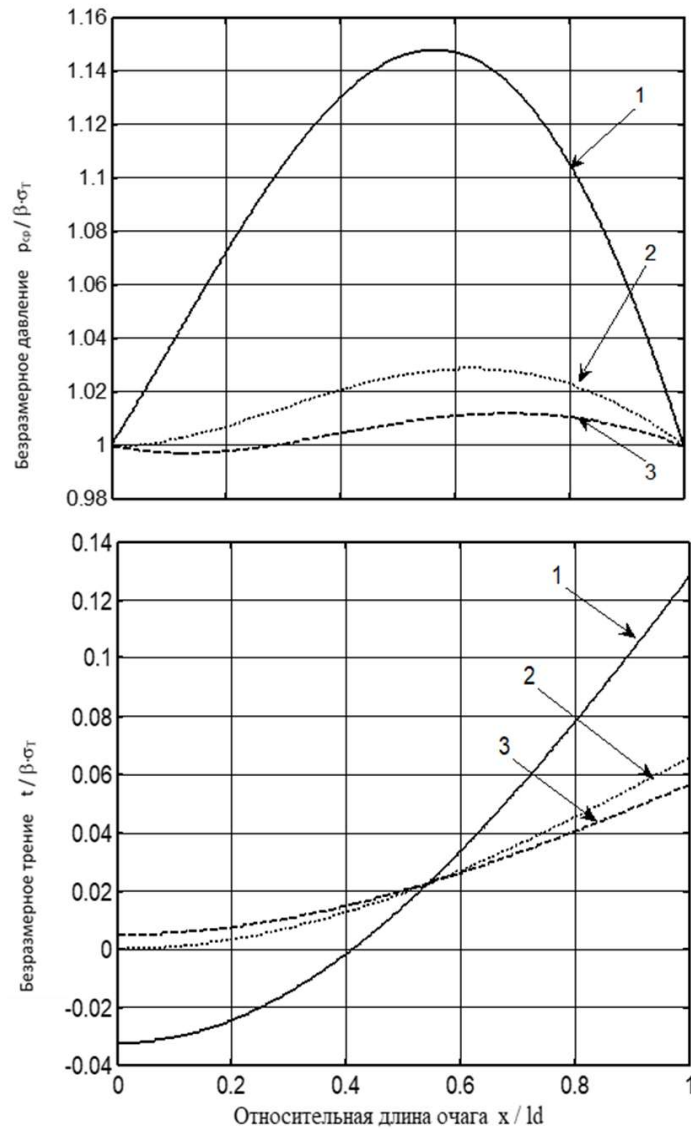


Рис. 2. Распределение безразмерных давления и удельных сил трения по длине очага деформации

При этом в случае прокатки с нулевым опережением результирующая между вытягивающими и выталкивающими силами  $Q_\varphi = \int_\varphi^\alpha q_x d\varphi$  (рис. 3, текущая площадь под кривой 1) остаётся положительной вплоть до сечения выхода металла из валков, в котором она принимает нулевое значение.

При прокатке с отрицательным опережением эта результирующая (рис. 3, текущая площадь под кривой 2) по длине контактной зоны меняет свой знак. Будучи положительной в сечениях вблизи плоскости входа, в центральной части очага деформации уменьшается и становится отрицательной. Ближе к сечению выхода из очага деформации эта сила вновь становится положительной. Анализ кривых изменения результирующей  $Q_\varphi$  позволяет объяснить причину устойчивости процесса прокатки с отрицательным

опережением при гидродинамическом режиме трения. Это связано с тем, что результирующая вытягивающих и выталкивающих сил  $Q_\varphi$  на значительной части входной зоны очага деформации направлена по ходу прокатки в отличие от ее направления при кулоновском трении, что и обеспечивает устойчивый процесс прокатки при однозонном скольжении металла в валках.

Следует также подчеркнуть, что при однозонном скольжении полосы в очаге деформации отсутствует подпирающее действие удельных сил трения, что приводит к существенному снижению давления металла на валки, уменьшению усилия прокатки и других энергосиловых параметров. Поэтому прокатка в указанных условиях является энергетически выгодным процессом.

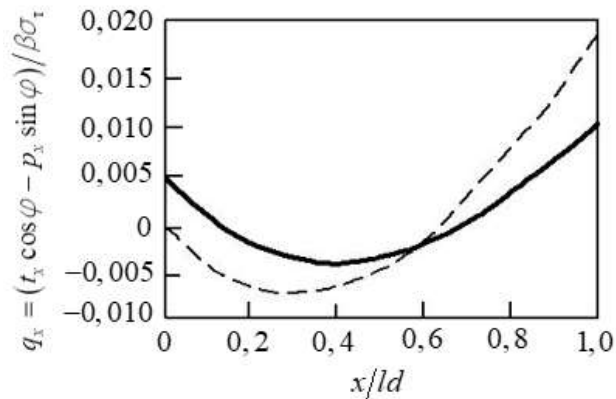


Рис. 3. Распределение безразмерной разности горизонтальных проекций напряжений давления и трения по очагу деформации

**Выводы.** Разработана методика расчета контактных напряжений при гидродинамическом режиме трения в контакте полосы с валками. Теоретически доказано, что процесс прокатки с эффективными технологическими смазками может совершаться устойчиво без частичных пробуксовок при однозонном скольжении металла в очаге деформации. Этому способствует толщина слоя смазки в контакте валков и полосы. Прокатка при нулевом опережении является энергетически выгодным процессом.

#### Список литературы

1. Грудев А. П. Захватывающая способность прокатных валков. М. : СП Интернет Инжиниринг, 1998. 283 с.
2. Павлов И. М., Белосевич В. К. К вопросу об отрицательном опережении при прокатке. Изв. вузов. Черная металлургия. 1964. № 9. С. 106–112.
3. Максименко О. П., Лейко О. Е. О переходе к режиму жидкостного трения при тонкопленочной смазке в условиях прокатки. Изв. вузов. Черная металлургия. 2003. № 10. С. 12–16.

4. Коднир Д. С. Контактная гидродинамика смазки деталей машин. М. : Машиностроение, 1976. 304 с.
5. Грудев А. П. Теория прокатки. М. : Металлургия, 1988. 240 с.
6. Петрусевич А. И. Основные выводы из контактно-гидродинамической теории смазки. Известия АН СССР, ОНТ. 1951. № 2. С. 209–223.
7. Mizuno T. An experimental research on cold rolling. 1. Report. Estimating the mechanism of the lubrication. Japan Society of Technology of Plasticity. 1966. № 7. P. 383–389.
8. Максименко О. П., Лясота С. М., Романюк Р. Я. Теорія процесів прокатного, трубного, ковально-штампувального та волочильного виробництва: навчальний посібник. Дніпродзержинськ: ДГТУ, 2011. 264 с.
9. Грудев А. П. Внешнее трение при прокатке. М. : Металлургия, 1973. 288 с.
10. Николаев В. А. Теория и практика процессов прокатки. Запорожье: ЗГИА, 2002. 300 с.

#### References (transliterated)

1. Grudev A. P. Zakhvatyvayushchaya sposobnost prokatnykh valkov. Moscow: SP Internet Inzhiniring, 1998. 283 p.
2. Pavlov I. M., Belosevich V. K. K voprosu ob otritsatel'nom operezhenii pri prokatke. Izv. vuzov. Chernaya metallurgiya. 1964. No 9. pp. 106–112.
3. Maksimenko O. P., Leyko O. E. O perehode k rezhimu zhidkostnogo treniya pri tonkoplenochnoy smazke v usloviyah prokatki. Izv. vuzov. Chernaya metallurgiya. 2003. – No 10. – pp. 12–16.
4. Kodnir D. S. Kontaktnaya gidrodinamika smazki detaley mashin. Moscow : Mashinostroenie, 1976. – 304 p.
5. Grudev A. P. Teoriya prokatki/ Moscow : Metallurgiya, 1988. – 240 p.
6. Petrusovich A. I. Osnovnyie vyivodyi iz kontaktno-gidrodinamicheskoy teorii smazki. Izvestiya AN SSSR, ONT. 1951. No 2. pp. 209–223.
7. Mizuno T. An experimental research on cold rolling. 1. Report. Estimating the mechanism of the lubrication. Japan Society of Technology of Plasticity. 1966. No 7. pp. 383–389.
8. Maksimenko O. P., Lyasota S.M., Romanyuk R.Ya. Teoriya protsesiv prokatnogo, trubnogo, kovalsko-shtampuvalnogo ta volochil'nogo vrobntstva: navchalniy poslbnik. DnIprodzerzhinsk : DGTU, 2011. – 264 p.
9. Grudev A. P. Vneshnee trenie pri prokatke. Moscow: Metallurgiya, 1973. – 288 p.
10. Nikolaev V. A. Teoriya i praktika protsessov prokatki. Zaporozhe : ZGIA, 2002. – 300 p.

Поступила (received) 01.11.2019

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

**Максименко Олег Павлович (Максименко Олег Павлович, Maksimenko Oleg Pavlovich)** – доктор технічних наук, професор, Дніпровський державний технічний університет, завідувач кафедри обробки металів тиском; м. Кам'янське, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0846-9869>; e-mail: O.maks1940@gmail.com

**Лобойко Дар'я Ігорівна (Лобойко Дар'я Ігорівна, Loboiko Daria Igorevna)** – Дніпровський державний технічний університет, асистент кафедри обробки металів тиском; м. Кам'янське, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9223-0329>; e-mail: darloboiko@gmail.com

**Постольник Лілія Василівна (Постольник Лилия Васильевна, Postolnyk Liliya Vasyilivna)** – Дніпровський державний технічний університет, студентка; м. Кам'янське, Україна



УДК 621.73

*А. Ю. МАТЮХІН, І. А. АЛЬФЬОРОВ, Т. А. СТЕФАНЕНКО, О. В. СТЕФАНЕНКО***СПОСОБИ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ КУВАННЯ ПОКОВОК ВИСОКОЛЕГОВАНИХ МАРОК СТАЛЕЙ ТА СПЛАВІВ НА ГІДРОПРЕСАХ**

В роботі розглянуті способи підвищення якості кування поковок високолегованих марок сталей та сплавів на гідропресах. Одним з основних способів керування якістю готової кованої продукції є вплив на напружено-деформований стан металу. В свою чергу, на напружено-деформований стан металу має вплив ряд чинників. До основних слід віднести фактор форми, а саме форма інструменту та форма злитку. Ще одним чинником, що впливає на розподіл напружено-деформованого стану металу є кінематичний фактор, а саме кінематика впливу інструменту на заготовку. Управління температурним полем заготовки при куванні також дозволяє впливати на напружено-деформований стан заготовки і мікроструктуру металу.

Збільшення точності розмірів і зниження підсумкової розмірної похибки можливо за рахунок збільшення часу додаткових кувальних операцій вигладжування, білетування, забивання, що займає більше 40% від основного часу кування. Таким чином, це означає збільшення часу непродуктивного використання номінальної потужності преса. Одним з рішень даної проблеми може бути використання прокатної кліти для калібрування поперечних розмірів поковок.

**Ключові слова:** кування, гідропрес, поковка, напружено-деформований стан, білетування, забивання куїв.

*А. Ю. МАТЮХІН, И. А. АЛЬФЕРОВ, Т. А. СТЕФАНЕНКО, О. В. СТЕФАНЕНКО***СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА КОВКИ ПОКОВОК ВЫСОКОЛЕГИРОВАННЫХ МАРОК СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ НА ГИДРОПРЕССАХ**

В работе рассмотрены способы повышения качестваковки поковок высоколегированных марок сталей и сплавов на гидропрессах. Одним из основных способов управления качеством готовой ковальной продукции является влияние на напряженно-деформированное состояние металла. В свою очередь, на напряженно-деформированное состояние металла влияет ряд факторов. К основным следует отнести фактор формы, а именно форма инструмента и форма слитка. Еще одним фактором, влияющим на распределение напряженно-деформированного состояния металла, является кинематическая фактор, а именно кинематика влияния инструмента на заготовку. Управление температурным полем заготовки при ковке также позволяет влиять на напряженно-деформированное состояние заготовки и микроструктуру металла.

Увеличение точности размеров и снижение итоговой размерной погрешности возможно за счет увеличения времени дополнительных ковочных операций выглаживания, билетировка, забивание углов, что занимает более 40% от основного времениковки. Таким образом, это означает увеличение времени непроизводительного использования номинальной мощности преса. Одним из решений данной проблемы может быть использование прокатной клетки для калибровки поперечных размеров поковок.

**Ключевые слова:** ковка, гидропресс, поковка, напряженно-деформированное состояние, билетировка, забивка углов.

*А. У. МАТИУХИН, I. А. АЛФЬОРОВ, Т. А. СТЕФАНЕНКО, О. В. СТЕФАНЕНКО***METHODS FOR IMPROVING QUALITY FORGING BLANK OF HIGH-ALLOYED STEELS GRADE AND ALLOYS ON HYDROPRESSES**

The paper discusses ways to improve the quality of forging blanks of high alloy steels and alloys on hydraulic presses. One of the main ways to control the quality of finished forged products is to influence the stress-strain state of the metal. In turn, a number of factors affect the stress-strain state of a metal. The main factor should include the form factor, namely the shape of the tool and the shape of the ingot. Another factor affecting the distribution of the stress-strain state of the metal is the kinematic factor, namely, the kinematics of the influence of the tool on the workpiece. The control of the temperature field of the workpiece during forging also allows you to influence the stress-strain state of the workpiece and the microstructure of the metal.

An increase in dimensional accuracy and a decrease in the total dimensional error is possible due to an increase in the time of additional forging smoothing operations, ticketing, clogging of corners, which takes more than 40% of the main forging time. Thus, this means an increase in the time of unproductive use of the rated power of the press. One solution to this problem could be to use a rolling stand to calibrate the transverse dimensions of the forging.

**Key words:** forging, hydraulic press, blank, stress-strain state, billing, corner driving.

**Вступ.** Розробка ресурсозберігаючого технологічного процесу, заснованого на оптимальному способі кування, дозволить вивести на новий рівень якість проектованої продукції і призведе до підвищення техніко-економічних показників виробництва. У зарубіжній і вітчизняній спеціалізованій літературі, присвяченій питанням оптимізації процесів пластичної деформації конструкційних і легованих сталей, розглядаються способи кування, що підтвердили свою практичну доцільність та пропонуються рекомендації щодо їх вдосконалення. Одне положення залишається сталим: на якість готової продукції ковальського виробництва прямий вплив має напружено-деформований стан металу. Таким чином, знаючи шляхи керування напружено-деформованого стану металу можна досягти високої якості кованих виробів та створити

ресурсозберігаючі технології процесу кування поковок високолегованих марок сталей та сплавів.

**Основна частина.** Розглянемо чинники, що впливають на напружено деформований стан металу. До основних слід віднести фактор форми, а саме форма інструменту. Існує велика кількість комбінацій інструменту для кування (рисунком 1). це бойки з пласкою робочою поверхнею (пласкі та зі скошеною поверхнею), комбіновані бойки (симетричні та несиметричні), профільовані бойки (вирізни, випуклі, радіальні, ступінчасті, бойки зі перехресними робочими поверхнями тощо).

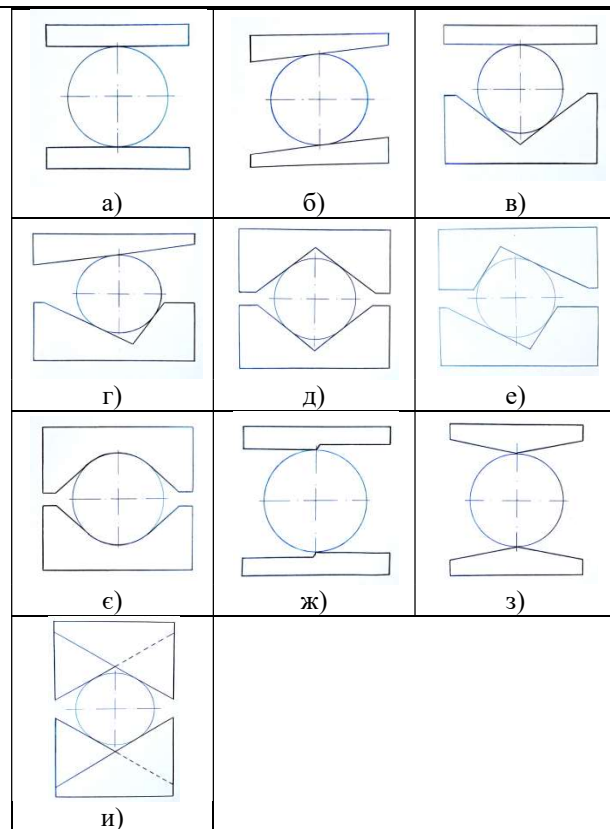


Рис. 1 – Форма інструменту, що застосовується для кування на гідропресах. Бойки з плоскою робочою поверхнею: а) плоскі; б) плоскі скошені. Комбіновані бойки: в) симетричні; г) несиметричні. Профільовані бойки: д) вирізні; е) вирізні несиметричні; є) радіальні; ж) ступінчасті; з) випуклі; и) з перехрестними робочими поверхнями

Практично всіма перерахованими бойками з однієї і тієї ж вихідної заготовки можна отримати однаковий виріб, але напружено-деформований стан заготовки в процесі кування у кожному конкретному випадку буде різним. Правильний підбір форми інструменту (бойків) сприяє поліпшенню рівномірності напружено-деформованого стану заготовки під час кування.

В роботі [1] наводяться результати експериментальних досліджень процесу протягування заготовки циліндричної форми. При куванні скошеними бойками кут скосу бойків не робить істотного впливу на заварювання дефектів. Для забезпечення найбільшого рівня зсувних деформацій в заготовці рекомендується застосування бойків з скосом 10-15° з одиничними обтискуваннями до 30%. Протягання слід здійснювати з подачею, яка дорівнює 1, або близькою до неї. Кування повинне вестися з постійним кантуванням заготовки при протягуванні за наступною схемою «обтиснення – кантування на 90° – обтиснення – кантування на 45° – обтиснення – кантування на 90° – обтиснення». Результати дослідження напруженого стану циліндричної заготовки при куванні вирізними асиметричними бойками дозволяють зробити висновок про сприятливість цієї схеми кування з точки зору

величини пластичної деформації металу в центрі заготовки.

Обтискування циліндричної заготовки ступінчастими бойками не повинне перевищувати 10-15% від діаметра заготовки. Доцільно застосовувати ступінчасті бойки з уступом, рівним 100 мм, і ходом обтиску 300 мм. При більшому обтискуванні бойками з великим уступом в поперечному перерізі заготовки спостерігається дефект у вигляді затиснення [1].

Іншим чинником фактора форми є форма злитку. До основних форм злитків слід віднести: злитки квадратного, круглого перетину, трьохпроменевий, багатогранний ковальський, слябовий злиток, плоский злиток, укорочений, безприбутковий та інше, заготовки круглого перетину, наприклад, отримані в машинах безперервного лиття (рисунок 2).

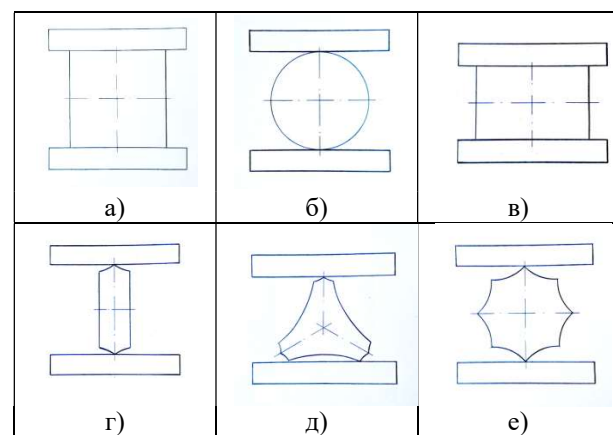


Рис. 2 – Форма злитків, що застосовується для кування на гідропресах: а) квадратний злиток; б) круглий злиток; в) слябовий злиток; г) плоский злиток; д) трьохпроменевий злиток; е) багатогранний злиток.

Кожен з даних злитків має ряд переваг і недоліків, характеризується істотними відмінностями за показниками хімічної, структурної неоднорідностей в результаті впливу ліквідаційних процесів, і, як наслідок, формує різний напружено-деформований стан виробу при куванні одним і тим же інструментом. Важливі оптимальна форма і геометричні параметри злитків.

Наступним чинником, що впливає на розподіл напружено-деформованого стану металу є кінематичний фактор, а саме кінематика впливу інструменту на заготовку. При куванні на гідравлічних кувальних пресах і кувальних молотах реалізується лінійне вертикальне переміщення деформуючого інструменту.

Практичний інтерес мають дані про зниження опору деформації при переведенні виконання операції кування з молота на гідропрес. Так для сплаву EI437A, Б (ХН77ТЮР) при температурі кування 1000°C і ступеню деформації 30% має місце зниження опору деформації з 62 кг/мм<sup>2</sup> для молота до 12 кг/мм<sup>2</sup> при куванні на пресі. Для сплаву EI617 – 104 кг/мм<sup>2</sup> на молоті та 16 кг/мм<sup>2</sup> при куванні на пресі [2].

Доцільно при розробці ресурсозберігаючого технологічного процесу врахувати ще один аспект, пов'язаний з особливостями конструкції і роботи гідравлічних пресів. На точність одержуваних розмірів

поперечного перерізу поковки впливають як власне характеристики гідравлічного преса (жорсткість конструкції, інерційність гідроприводу), так і опір заготовки деформації, який, в свою чергу, залежить від тривалості протікання в металі заготовки процесів зміцнення і знеміцнення. Згідно з даними [3] точність поперечних розмірів поковки при куванні на пресі 63 МН обмежена швидкісним прогином – 7 мм, інерційним прогином – 3,1 мм і прогином столу – 3-4 мм. Таким чином, підсумкова розмірна помилка по висоті становить 14-15 мм, що змушує збільшувати припуски на кування на цю величину.

Збільшення точності розмірів і зниження підсумкової розмірної помилки можливо за рахунок збільшення часу додаткових кувальних операцій вигладжування, білетування, забивання кутів, що займає більше 40% від основного часу кування. Таким чином, це означає збільшення часу непродуктивного використання номінальної потужності преса. Рішення даної проблеми наведено в патенті UA №48451 [4] і полягає у використанні прокатної кліті для калібрування поперечних розмірів поковки. Так, зменшення кувального розміру на величину підсумкової розмірної помилки 14-15 мм при середній довжині заготовки 4 м для сталі 4Х5МФС, 4Х5МЗФ призводить до зменшення відходу з 555 кг до 283 кг, тобто в 1,96 рази. Час обробки на обдирання і обточування штанг інструментальних сталей, що становить 11,61 години, скорочується на третину. Таким чином, продуктивність праці збільшується приблизно на 30-40%.

У свою чергу, в роботі [2] розглядається оптимізація кількості формуютьючих технологічних операцій кування шляхом розробки комбінованого процесу пластичної деформації (кування + прокатування) і виключення операцій білетування/проглажування. Склад кувальних операцій залежить від ступеня легування сталей і сплавів, котрий впливає на швидкість кристалізації. Низька швидкість рекристалізації в порівнянні зі швидкістю деформації не сприяє повному проходженню процесу знеміцнення.

У циклі кування значний час займають допоміжні операції – проглажування, білетування, забивання кутів. Так, для сплаву Е1437А, ці додаткові операції складають 32,32% всього часу кування, для ЕП708-ВД – 42,6%, для високолегованої інструментальної сталі 4Х5МФС, 4Х5МЗФ – 39,93%. На цих операціях споживана потужність не перевищує 0,03-0,04 номінального зусилля преса Рн. Отже, виключення допоміжних кувальних операцій і виконання їх, наприклад, окремої обтискної кліті компактного прокатного стану, встановленого в лінії кувального агрегату, дозволить підвищити продуктивність роботи преса в середньому в 1,4 рази. Обтискна кліть буде розрахована тільки на калібрування розмірів поперечного перерізу кованої заготовки з невеликими значеннями відносного обтиску. Можливе застосування спеціального вагона-термоса для передачі кованої заготовки температури кінця кування

на окремих (не в лінії кувального агрегату) прокатний стан. Зусилля прокатки (калібрування), розраховане згідно залежностей [5], не перевищує 2,5-4,0 МН, а споживана потужність кліті не перевищує 200 кВт при швидкості прокатування 1м/с.

Управління механічним режимом включає в себе варіювання величиною подачі заготовки, її обтисненням, послідовністю кантування, що істотно впливає на деформований стан заготовки. Для визначення оптимального режиму кування, завданням якого на першому етапі є трансформація дендритної структури злитка в волокнисту структуру заготовки, а на другому етапі – отримання дрібнозернистої структури, необхідно враховувати масштабні рівні пластичної деформації металів [6], представлені в таблиці 1.

Тому при куванні злитків в мегамакромасштабному інтервалі пластичної деформації основними параметрами кування є ступінь деформації, температура і час витримки при цій температурі, які повинні бути на рівні максимально допустимих, а волокно (осі дендритів 1-го порядку) в заготовці має бути орієнтоване в напрямку дії максимальних робочих напружень в готовому виробі. Другий період кування, спрямований на формування дрібнозернистої структури в поковці, охоплює два масштабних рівня (мезо I, мікро) і відповідно два структурних рівня (дрібнозерниста і дислокаційна структури). Одним з головних параметрів, що впливають на досягнення дрібнозернистої структури в крупних поковках, є швидкість деформації.

Таблиця 1. Масштабні рівні пластичної деформації металів при куванні

Найменування рівня	Структура рівня
Мега	Дендритна
Мезо {d-f}	Дендритно-волокниста
Макро	Волокниста
Мезо II	Крупнозерниста
Мезо I	Дрібнозерниста з дислокаційними ансамблями
Мікро	Дислокаційна
Мезо {m-n}	Ультрамикрокристалічна
Нано	Наноструктура (атомно-молекулярна)

Крім вище зазначеного, у реальних виробничих умовах багатьох підприємств технологи стикаються з проблемами тріщиноутворенням, незаковами, великим зерном, відхиленнями геометрії від заданої і іншими дефектами, причиною яких є нестабільність технологічного виходу при використовуваному термомеханічному режимі. Важливо виділити і зменшити негативний вплив на якість виробу і процесу конкретного фактора, наприклад, нерівномірності

температурного поля або температури нагріву під деформацію.

Управління температурним полем заготовки при куванні дозволяє впливати на напружено-деформований стан заготовки і мікроструктуру. Заготовка може мати різний вигляд температурного поля: однорідне температурне поле, неоднорідне симетричне з різним видом розподілу температур по перетину і неоднорідне несиметричне.

Вплив температурного поля на напружено-деформований стан металу розглянуто в роботі [7]. За думкою автора, протягання циліндричної заготовки раціонально і технологічно виправдано виконувати наступним чином :

– для кування плоскими бойками: при наявності рівномірного температурного поля заготовки протяжку здійснювати з відносною подачею від 0,5 до 1,1 і величиною відносного обтиску, що дорівнює 0,1...0,2. Після падіння температури поверхні заготовки в процесі кування до 1000°C слід здійснювати протягання з відносною подачею 0,5 ... 1,1 і величиною обтиску 0,1...0,15. При досягненні поверхні заготовки температури 900°C необхідно здійснювати протягання з відносною подачею від 0,3 до 1,1 з тією ж величиною обтиску, а при падінні температури поверхні ще на 100°C необхідно зменшити величину обтиску до 0,05...0,1 при тих же подачах. Рекомендується при наступному проході здійснювати протягання зі зміщенням заготовки на половину ширини бойка, що дозволить забезпечити більш рівномірний розподіл інтенсивності логарифмічних деформацій уздовж осі заготовки.

– для кування комбінованими бойками: при наявності рівномірного температурного поля заготовки протягання здійснювати з відносною подачею від 0,3 до 0,5 і величиною обтиску рівній 0,15...0,25. Після падіння температури поверхні заготовки в процесі кування до 1000°C слід здійснювати протягання з відносною подачею 0,5...0,7 і величиною обтиску 0,2...0,25. При досягненні поверхні заготовки температури 900°C необхідно здійснювати протягання з відносною подачею від 0,7 до 1,1 з тією ж величиною обтиску, а при падінні температури поверхні ще на 100°C необхідно зменшити величину обтиску до 0,15...0,2 при тих же подачах.

Кування заготовки з нерівномірним температурним полем (заготовка з двома низькотемпературними симетрично розташованими зонами) [8] дозволяє підвищити рівень зсувних деформацій, поліпшити напружено-деформований стан центральної частини заготовки. Нагріта циліндрична заготовка перед куванням плоскими бойками піддається охолодженню з двох сторін, таким чином, щоб в заготовці виникло нерівномірне температурне поле з локальними низькотемпературними зонами, розташованими з двох сторін заготовки симетрично один до одного. Після охолодження поверхні заготовки до певної температури її встановлюють в пласкі бойки таким чином, щоб утворився кут  $\alpha$  між плоскою поверхнею

бойків і нижньою межею низькотемпературної зони заготовки, після чого починають обтискання заготовки бойками, що дозволяє отримувати поковки типу валів з підвищеними механічними властивостями при мінімальних уковах в пласких бойків.

З іншого боку, при протягуванні з нерівномірним температурним полем показник жорсткості напруженого стану вище в 4 рази. Зі збільшенням показника жорсткості напруженого стану пластичність металу знижується.

**Висновки.** Встановлено основні напрямки вдосконалення технологічних процесів кування поковок циліндричної форми (пруток, штанга):

– зміна геометрії інструменту або оптимальна комбінація інструменту різної геометрії,

– передача виконання допоміжних операцій пластичного деформування (білетіровка, прогладжування) з кувального комплексу на прокатну кліть для підвищення коефіцієнта використання виробничих потужностей обладнання. Прокатна кліть може бути встановлена в одній лінії з кувальним комплексом. Прогладжування сорту в прокатній кліті дозволить істотно знизити припуски на механічну обробку, що в свою чергу значно підвищить продуктивність ад'юстажних ділянок і вихід придатної товарної продукції,

– скорочення часу винесення металу на кування (організаційні заходи – чіткий регламент дій, маніпулятори),

– врахування температури внутрішнього розігріву за рахунок теплоти, яка буде утворена при деформації, при нагріванні злитка (заготовки) під кування,

– математичне моделювання процесу кування за критерієм впливу швидкості і ступеня деформації на структуру (зерно) сталі, виключення або зниження утворення поверхневих дефектів (тріщин) і, відповідно, підвищення виходу придатної металопродукції.

#### Список літератури

1. Жбанков Я.Г. Развитие научных основ процессов пластического деформирования и совершенствование технологийковки крупных поковок/дис. на соискание доктора техн.наук / Я. Г. Жбанков – Краматорск, 2016.-594 с: ил.
2. Підвищення продуктивності кування крупного сорту на гідравлічних пресах//Д.В. Обдул, В.Д. Обдул, В.В. Дувинг, В.І. Третяк//Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні.-2009.-№2.-С.73-75.
3. Золотухин Н.М. Экспериментальное исследование сопротивления поковок деформированию при протяжке / Н.М. Золотухин, О.М. Шинкаренко//Кузнечно-штамповочное производство. – 1980. – №3. – С.3-5.
4. Патент на корисну модель UA №48451 МПК В 21 J 5/00. Спосіб кування сортового металу / Д.В. Обдул, В.Д. Обдул, В.В. Чигиринський, О.В. Дергачев, В.В. Дувинг (Україна) – №48451; заявл. 21.09.2009; опубл. 10.03.2010, Бюл. №5.
5. Целиков А.И. Теория продольной прокатки//А.И. Целиков, Г.С. Никотин, С.Е. Рокотян. М.: Металлургия, 1980.-320с.
6. Онищенко А.К. Масштабные уровни пластической деформации и термомеханические параметрыковки слитков и заготовок//А.К. Онищенко// Кузнечно-штамповочное производство. –2009.– №4.-С.9-12.
7. Заблоцкий В.К. Протяжка заготовок с неоднородным температурным полем//В.К. Заблоцкий, Я.Г. Жбанков, А.А. Швец, В.В. Панов//Научный вестник ДГМА.– 2013. – №2(12Е). – С.52-62.

8. Биргер И.А., Мавлютов Р.Р. Сопrotивление материалов. Учебное пособие. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат.лит., 1986.-560 с.

#### References (transliterated)

- Zhbankov Ya.G. Razvitiye nauchny'kh osnov prozessov plasticheskogo deformirovaniya i sovershenstvovanie tekhnologiy kovki krupny'kh pokovok/dis. na soiskanie doktora tekhn.nauk / Ya. G. Zhbankov – Kramatorsk, 2016.-594 p: il.
- Pi'dvishhennya produktivnosti' kuvannya krupnogo sortu na gi'dravli'chnikh presakh/[D.V. Obdul, V.D. Obdul, V.V. Duving, V.I. Tretyak]/Novi' materi'ali i' tekhnologiyi v metallurgiyi ta mashinobuduvanni'.-2009.-No.2.-P.73-75.
- Zolotukhin N.M. E'ksperimental'noe issledovanie soprotivleniya pokovok deformirovaniyu pri protyazhke / N.M. Zolotukhin, O.M. Shinkarenko//Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo. – 1980. – No.3. – P.3-5.
- Patent na korisnu model' UA #48451 MPK V 21 J 5/00. Sposi'b kuvannya sortovogo metalu / D.V. Obdul, V.D. Obdul, V.V. Chigirins'kij, O.V. Dergachev, V.V. Duv'ng (Ukrayina) – No.48451; zayavl. 21.09.2009; opubl. 10.03.2010, Byul. No.5.
- Czelikov A.I. Teoriya prodol'noj prokatki/A.I. Czelikov, G.S. Nikotin, S.E. Rokotyau. Moscow.: Metallurgiya, 1980.-320p.
- Onishhenko A.K. Masshtabny'e urovni plasticheskoy deformaczii termomekhanicheskie parametry' kovki slitkov i zagotovok/A.K. Onishhenko// Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo. –2009.– No.4.-P.9-12.
- Zabloczkij V.K. Protiazhka zagotovok s neodnorodny'm temperaturny'm polem//V.K. Zabloczkij, Ya.G. Zhbankov, A.A. Shvecz, V.V. Panov//Nauchny'j vestnik DGMA.– 2013. – No. 2 (12E). – P.52-62.
- Birger I.A., Mavlyutov R.R. Soprotivlenie materialov. Uchebnoe posobie. – Moscow.: Nauka. Gl. red. fiz.-mat.lit., 1986.-560 p.

Надійшла (received) 10.11.2019

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

**Матюхін Антон Юрійович (Матюхин Антон Юрьевич, Matiukhin Anton Yuriyovich)** – кандидат технічних наук, Національний університет «Запорізька політехніка», доцент кафедри «Обробка металів тиском»; м. Запоріжжя, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2261-0577>; e-mail: mco2005@i.ua

**Алфєров Ігор Анатолійович (Алферов Игорь Анатольевич, Alfyorov Igor Anatolyevich)** – начальник Управління якості ПрАТ «ДНІПРОСПЕЦСТАЛЬ»; м. Запоріжжя, Україна; e-mail: alferov.igor@dss.com.ua

**Стефаненко Тетяна Анатоліївна (Стефаненко Татьяна Анатольевна, Stefanenko Tetiana Anatolievna)** – провідний інженер відділу СМЯ ПрАТ «ДНІПРОСПЕЦСТАЛЬ» »; м. Запоріжжя, Україна; e-mail: stefanenko.tat@dss.com.ua

**Стефаненко Оксана Віталіївна (Стефаненко Оксана Витальевна, Stefanenko Oksana Vitaliyevna)** – Національний університет «Запорізька політехніка», студентка кафедри «Обробка металів тиском»; м. Запоріжжя, Україна; e-mail: oksana27081997@gmail.com



.УДК 620.179.16

**К. Л. НОЗДРАЧОВА****РОЗДІЛЬНО-ПОЄДНАНИЙ БЕЗКОНТАКТНИЙ УЛЬТРАЗВУКОВИЙ ЄМНІСНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ІМПУЛЬСАМИ ПОВЕРХНЕВИХ ХВИЛЬ**

Розглянуті способи реалізації високочастотних ємнісних перетворювачів, нове виконання яких дозволило б підвищити достовірність виявлення дефектів об'єктів контролю за рахунок зменшення впливу когерентних завад. Поставлена задача вирішується так, що в ультразвуковому роздільно-поєднаному високочастотному ємнісному перетворювачі для контролю імпульсами хвиль Релея, що містить корпус та закріплені в ньому протектор, з'єднувачі, дві секції полоскових електродів розміщених в неелектропровідній неферромагнітній основі. Одна секція полоскових електродів є збуджуючою, а друга приймальною, обидві секції електродів розміщені в одній площині таким чином, що полоскові електроди секцій розташовані одна від одної на заданій відстані вздовж осі, яка перпендикулярна напрямку випромінювання ультразвукових імпульсів вздовж поверхні виробу, при цьому лінійні частини полоскових електродів збуджуючої та приймаючої секцій орієнтовані одна до одної під заданим кутом, перша збуджуюча секція полоскових електродів зміщена по відношенню до другої приймаючої секції полоскових електродів в напрямку випромінювання імпульсів хвиль Релея на задану величину. А також іще один спосіб, де секції полоскових електродів зміщені на задану величину вздовж відносно осі напрямку випромінювання імпульсів поверхневих ультразвукових хвиль. Перетворювач даної конструкції має підвищену захищеність від когерентних акустичних завад від різних типів ультразвукових хвиль.

**Ключові слова:** ультразвуковий контроль, безконтактний перетворювач, ємнісний перетворювач, електричне поле, електричні імпульси, вимірювання, діагностика, хвилі Релея.

**Е.Л. НОЗДРАЧЕВА****РАЗДЕЛЬНО-СОВМЕЩЕННЫЙ БЕСКОНТАКТНЫЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ЕМКОСТНОЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ИМПУЛЬСАМИ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН**

Рассмотрены способы реализации высокочастотных емкостных преобразователей, новое исполнение которых позволило бы повысить достоверность выявления дефектов объектов контроля за счет уменьшения влияния когерентных помех. Поставленная задача решается так, что в ультразвуковом раздельно-совмещенном высокочастотном емкостном преобразователе для контроля импульсами волн Рэлея, содержащий корпус и закрепленные в нем протектор, соединители, две секции полосковых электродов, размещенных в неэлектропроводных неферромагнитными основе. Одна секция полосковых электродов является возбуждающей, а вторая приемной, обе секции электродов размещены в одной плоскости таким образом, что полосковые электроды секций расположены друг от друга на заданном расстоянии вдоль оси, перпендикулярной направлению излучения ультразвуковых импульсов вдоль поверхности изделия, при этом линейные части полосковых электродов возбуждающей и принимающей секций ориентированы друг к другу под заданным углом, первая возбуждающая секция полосковых электродов смещена по отношению ко второй принимающей секции полосковых электродов в направлении излучения импульсов волн Рэлея на заданную величину. А также еще один способ, где секции полосковых электродов смещены на заданную величину вдоль относительно оси направления излучения импульсов поверхностных ультразвуковых волн. Преобразователь данной конструкции имеет повышенную защищенность от когерентных акустических помех от различных типов ультразвуковых волн.

**Ключевые слова:** ультразвуковой контроль, бесконтактный преобразователь, емкостной преобразователь, электрическое поле, электрические импульсы, измерения, диагностика, волны Рэлея.

**K.L. NOZDRACHOVA****DUALS CAPACITIVE NON-CONTACTING ULTRASONIC TRANSDUCERS FOR IMPULSE CONTROL SURFACE WAVES**

The ways of realization of high-frequency capacitive transducers are considered, the new implementation of which would increase the reliability of detection of defects of testing objects by reducing the influence of coherent interference. The problem is solved so that in an ultrasonic separately coupled high-frequency capacitive converter to control the pulses of Rayleigh waves, containing the housing and the protector, connectors, two sections of strip electrodes housed in non-conductive non-ferromagnetic base. One section of the strip electrodes is exciting and the other is receiving, both sections of the electrodes are arranged in the same plane so that the strip electrodes of the sections are located at a predetermined distance along the axis, which is perpendicular to the direction of radiation of the ultrasonic pulses along the surface of the left side the electrodes of the excitation and receiving sections are oriented to each other at a predetermined angle, the first excitation section of the strip electrodes is displaced against to the second receiving section of the strip electrodes direction of radiation pulses of Rayleigh waves at a given value. Another way where the sections of the strip electrodes are displaced by a given value along the axis of the direction of radiation of the pulses of surface ultrasonic waves. The transducer of this construction has increased protection against coherent acoustic interference from various types of ultrasonic waves.

**Key words:** ultrasonic testing, non-contact transducer, capacitive transducer, electric field, electric pulses, measurements, diagnostics, volume waves.

**Вступ.** В даний час на металургійних підприємствах створені і досить ефективно працюють системи забезпечення якості продукції, що випускається. До одних з головних властивостей, які характеризують якість будь-яких виробів, відносяться їх надійність і безпека. Виключно важливу роль в забезпеченні необхідного рівня цих властивостей грають методи неруйнівного контролю. Використання неруйнівного контролю та технічної діагностики набуває все більшого значення, особливо при виробництві та експлуатації дорогих і наукомістких об'єктів. Цілком очевидно, що недостатність контролю

або його недостовірність можуть призводити до значних економічних втрат, а в ряді випадків до серйозних аварій і екологічних катастроф. Ультразвуковий контроль найбільш поширений фізичний метод неруйнівного контролю. У порівнянні з іншими методами ультразвуковий контроль має такі переваги: високу чутливість і продуктивність, можливість контролю при односторонньому доступі, відносно низьку вартість обладнання, безпеку. Недоліками ультразвукового контролю є: складна розшифровка дефектів, обмежене застосування для металів з великим зерном, складність контролю

© К.Л. Ноздрачова, 2019

виробів товщиною від 4 до 10 мм (при товщині до 4 мм ультразвуковий контроль практично не застосовується), необхідність розробки спеціальних методик (технологічних інструкцій, технологічних карт) при дефектоскопії виробів різних типів.

Ультразвуковий метод застосовують в основному для виявлення внутрішніх дефектів, але може бути використаний і для виявлення поверхневих дефектів. Найважливішою перевагою ультразвукового контролю є висока ймовірність виявлення найбільш небезпечних площинних дефектів. Експериментальним шляхом встановлено, що продуктивність ультразвукового контролю в середньому в 3-10 разів вище радіографічного [1]. Крім того, собівартість ультразвукового контролю в 4-8 разів нижче.

Ультразвуковий контроль є найбільш затребуваним фізичним методом неруйнівного контролю металовиробів. Однак необхідно врахувати, що його застосування пов'язане зі складною розшифровкою результатів контролю, а методики контролю різних типів з'єднань істотно розрізняються.

**Аналіз стану питання.** Традиційний ультразвуковий неруйнівний контроль поверхневими хвилями не отримав широкого застосування у зв'язку з фізичними обмеженнями (мала глибина прозвучування, вимога до якості поверхні). До того ж там, де можна використовувати релеєвські хвилі, цей метод часто замінюють дешевшими магнітними методами.

В даний час поверхневі хвилі використовують для обмеженої кількості виробів, таких як, наприклад, деталі після остаточної обробки, калібровані продукти та ін., так як загасання поверхневих хвиль крім ослаблення в матеріалі об'єкта обумовлюється ще й мікронерівностями поверхні, слідами бруду, мастила і т. п. [2]

Тріщини, щоб бути виявленими поверхневими хвилями, повинні бути незаповненими, тобто якщо тріщина має вихід назовні, то в результаті заповнення мастилом або водою вона може бути і не виявлена.

Але в той же час можна виявляти підповерхневі тріщини, що не виходять назовні, на відміну, наприклад, від капілярного методу [3].

**Постановка проблеми.** В умовах виробництва має велике значення продуктивність контролю. Ультразвукова дефектоскопія за допомогою об'ємних хвиль, а також вихрострумний контроль передбачає сканування всієї поверхні. Ця операція вимагає великих витрат часу. Хвилями Релея можна охопити велику площу контрольованого об'єкта не переміщуючи перетворювач. Зважаючи на мале загасання поверхневих хвиль вони поширюються на велику відстань, це дозволяє проводити дискретне сканування протяжних об'єктів з великим кроком, що мінімізує часові витрати. Використання поверхневих хвиль для контролю об'єктів складної форми дозволить отримати відчутний економічний ефект, особливо це актуально для об'єктів, що перебувають в експлуатації.

**Мета роботи.** Розробити і удосконалити нові типи емнісних перетворювачів для контролю

металовиробів акустичними методами неруйнівного контролю, що забезпечували б збудження імпульсів ультразвукових поверхневих хвиль і мали високу захищеність від когерентних акустичних завад.

**Основна частина.** Контроль в процесі експлуатації вимагає портативності, безконтактності, що дозволить проводити контроль без ретельної зачистки об'єкту, довгого часу роботи від акумуляторів без підзарядки, малої ваги і деяких інших специфічних для конкретних областей застосування властивостей приладів.

З цієї точки зору застосування магнітних методів обмежена через їх громіздкість і енергоємність, а застосування ультразвукового контролю поверхневими хвилями, навпаки, надає величезні можливості – при набагато менших енерговитратах і порівняно малих габаритах він дозволяє вести всебічне дослідження зразка з високою швидкістю.

Технічна реалізація ультразвукових методів порівняно проста, якщо розглядати аналогічні портативні прилади для магнітного і вихрострумного контролю.

Відомі з літератури [4, 5] безконтактні ультразвукові перетворювачі для збудження імпульсів хвиль Релея та Лемба, які, в залежності від конструкції, можуть формувати різні діаграми спрямованості акустичного поля. Оскільки об'єкт контролю (ОК) приймає безпосередню участь в збудженні і прийомі акустичних імпульсів, то його характеристики також слід враховувати при конструюванні перетворювачів. Металевий корпус ультразвукового перетворювача виконує роль електромагнітного екрана, що в комплексі з іншими елементами конструкції підвищує завадостійкість і міцність конструкції. Важливими елементами приладу є збуджуючий та приймаючий елементи, які визначають частоту ультразвукових імпульсів у поверхневому шарі ОК, яка, як правило, задається нормативно-технічною документацією.

Недоліком цих перетворювачів є формування діаграми спрямованості акустичного поля в двох протилежних напрямках, що може приводити до появи імпульсів когерентних завад і, відповідно, до неправильної оцінки якості ОК.

В роботах [6, 7] описується безконтактний ультразвуковий перетворювач, що складається з плоского індуктора в вигляді плоскої "зигзагоподібної" котушки із заданим для даної частоти періодом намотки провідників.

Недоліком перетворювача є те, що при такому геометричному виконанні індуктора діаграма спрямованості збуджених ультразвукових коливань також є двонаправленою. Наявність джерела магнітного поля при контролі феромагнітних виробів приводить до швидкого зносу перетворювача. Окрім того, одночасно збуджуються імпульси завад когерентних частот об'ємних хвиль, що може призвести до неправильної оцінки якості ОК.

З метою показати перспективність безконтактного ультразвукового контролю поверхневими хвилями було розроблено емнісний перетворювач (ЄП), нове виконання якого дозволило б

підвищити достовірність виявлення дефектів ОК за рахунок зменшення впливу діаграми спрямованості акустичного поля у двох протилежних напрямках та впливу завад когерентних частот об'ємних хвиль, а також підвищити довговічність ЄП.

Наведений на рис. 1. ЄП працює наступним чином: корпус 1, розташовують на поверхні ОК 11 так, щоб протектор 2 прилягав до поверхні ОК 11. Наприклад через з'єднувач 8 на полоскові елементи 5 секції 3 подається постійна і імпульсна напруги. В результаті на поверхневий шар ОК 11 діє постійне і імпульсне електричні поля, що приводить до збудження хвиль Релея (при тонких ОК збуджуються хвилі Лемба), які поширюються вздовж поверхні виробу 11 переважно нормально поздовжнім частинам полоскових елементів 5. Створене акустичне поле сканує поверхню ОК хвилями Релея або об'єм тонкого виробу хвилями Лемба. Якщо в ОК є дефект, то ультразвукові імпульси відбиваються від нього і надходять до полоскових елементів 6 секції 4 (рис. 2), приймаються за рахунок зворотного перетворення механічних коливань в електричні сигнали при поданні на полоскові елементи 6 секції 4 постійної напруги через з'єднувач 9. При цьому за рахунок розташування полоскових елементів 5 і 6 секцій 3 і 4 на відстані  $l = K\lambda$ , де  $l$  – відстань між збуджуючими та приймальними елементами ЄП;  $\lambda$  – довжина хвилі Релея, яка підлягає збудженню в об'єкті контролю та прийому з нього;  $K$  – експериментально визначений коефіцієнт, а також орієнтації полоскових елементів 5 і 6 під кутом  $120^\circ \pm 10^\circ$  виключається прийом когерентних акустичних завад. Або зміщення секцій 3 і 4 вздовж напрямку 10 випромінювання ультразвукових імпульсів на величину  $L = n\lambda/2$ , де  $\lambda$  – довжина поверхневої хвилі, яка збуджується у матеріалі ОК 11, мм, а  $n$  – ціле непарне число, виключається прийом когерентних акустичних завад.

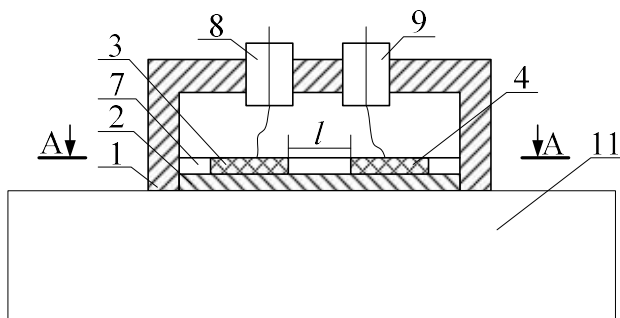


Рис. 1 – Спрощена схема роздільно – поєднаного ультразвукового емнісного перетворювача для контролю імпульсами поверхневих хвиль та його розміщення на ОК

Встановлення відстані  $L$  кратною кільком половинам довжини високочастотної ультразвукової поверхневої хвилі необхідно для забезпечення більшої ефективності зі зменшення впливу когерентних завад від високочастотних імпульсів інших типів ультразвукових хвиль, які збуджуються одночасно з поверхневими.

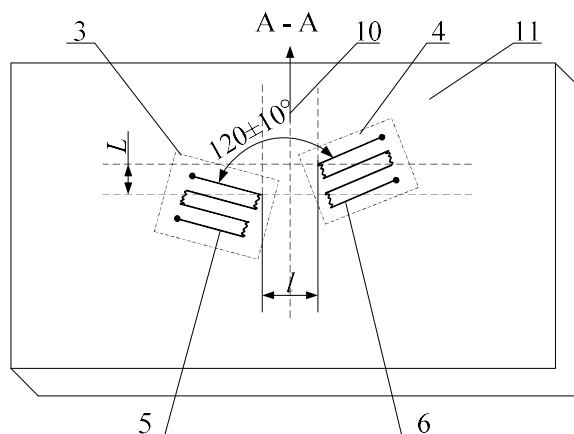


Рис. 2 – Розташування полоскових електродів секцій ЄП на поверхні ОК.

Окрім того, поверхня ОК 11 сканується тільки в одній його частині, яка знаходиться в області розкриття тупого кута  $120^\circ \pm 10^\circ$ , що також зменшує прийняття акустичних завад.

Іще однією реалізацією усунення когерентних завад (рис. 3) є розміщення полоскових елементів 5 і 6 секцій 3 і 4 на відстані  $L$  між збуджуючою 6 та приймальною 5 секціями ЄП, орієнтацією полоскових електродів 3 і 4 під кутом  $120 + 30^\circ$ , а також зміщення секцій 5 і 6 вздовж напрямку 10 випромінювання ультразвукових імпульсів на величину  $l = C(t + \tau)$ ,

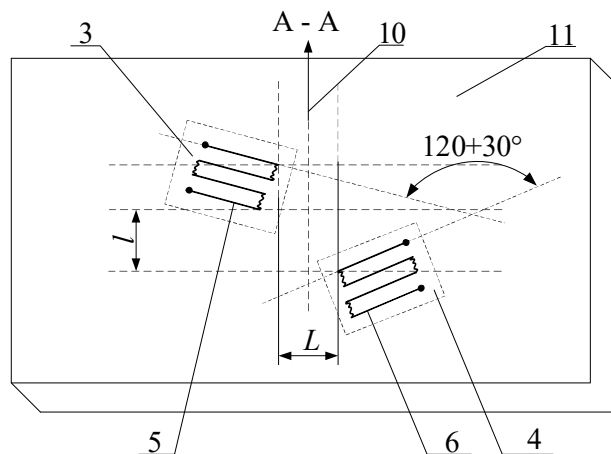


Рис. 3 – Розташування полоскових електродів секцій ЄП на поверхні ОК.

де  $C$  – швидкість поширення імпульсів ультразвукових високочастотних поверхневих хвиль в матеріалі виробу 11 який контролюється, мм;  $t$  – час поширення у виробі 11 імпульсів ультразвукових високочастотних поверхневих хвиль від збуджуючої секції 3 полоскових електродів 5 до приймальної секції 4 полоскових електродів 6, мкс;  $\tau$  – час дії поверхневого ультразвукового імпульсу при його збудженні, мкс. Величину  $l$  вибирають з умови, що за час  $t + \tau$  перехідні процеси збудження ультразвукових імпульсів закінчуються і прийом корисних сигналів буде проходити без впливу когерентних завад.

**Висновок.** Технічним результатом розробки є те, що емнісний перетворювач даної конструкції має високу захищеність від когерентних акустичних завад.

В результаті запропонованих перетворювач і способи розташування його поперечних електродів підвищують достовірність ультразвукового контролю поверхні електропровідних виробів поверхневими ультразвуковими хвилями при високій продуктивності діагностики.

#### Список літератури

1. Коновалов Н. Н. Оценка показателей достоверности ультразвукового контроля сварных соединений // Дефектоскопия. 2003. № 9. С. 4–8.
2. Ультразвуковой контроль материалов: Справ. изд. Й. Крауткремер, Г. Крауткремер; пер. с нем. – М.: Металлургия, 1991, 752 с.
3. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 3: Ультразвуковой контроль / И.Н. Ермолов, Ю.В. Ланге. – М.: Машиностроение, 2004. – 864 с.: ил.
4. Викторов И.А. Звуковые поверхностные волны в твердых телах. М.: Наука, 1981.
5. Комаров В.А. Квазистационарное электромагнитно – акустическое преобразование в металлах / В.А. Комаров. – Свердловск: УНЦ АН СССР, 1986. – 235 с.
6. Сучков Г. М., Плеснецов С. Ю., Мещеряков С. Ю., Юданова Н. Н. Новые разработки электромагнитно-акустических преобразователей (обзор) // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. 2018. №3. С. 27–34.
7. Горделий В.И. Современные электромагнитно-акустические преобразователи для неразрушающего контроля / В.И. Горделий, В.Е.Чабанов // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2005. – № 2. – С. 59–60.

#### References (transliterated)

1. Konovalov N. N. Otsenka pokazateley dostovernosti ul'trazvukovogo kontrolya svarnykh soyedineniy [Assessment of reliability indicators of ultrasonic testing of welded joints] // Defektoskopiya [Defectoscopy]. 2003. No 9. – P. 4–8.
2. Ul'trazvukovoy kontrol' materialov [Ultrasonic testing of materials]: Sprav. izd. Y. Krautkremer, G. Krautkremer; per. s nem. – Moscow : Metallurgiya, 1991, 752 s.
3. Nerazrushayushchiy kontrol' [Non-destructive testing]: Spravochnik: V 7 t. Pod obshch. red. V.V. Klyuyeva. Vol. 3: Ul'trazvukovoy kontrol' / I.N. Yermolov, YU.V. Lange. – Moscow : Mashinostroyeniye, 2004. – 864 p.: il.
4. Viktorov I.A. Zvukovyye poverkhnostnyye volny v tvordykh telakh [Sound surface waves in solids]. Moscow : Nauka, 1981.
5. Komarov V.A. Kvazistatsionarnoye elektromagnitno – akusticheskoye preobrazovaniye v metallakh [Quasistationary electromagnetic – acoustic transformation in metals] / V.A. Komarov. – Sverdlovsk: UNTS AN SSSR, 1986. – 235 p.
6. Suchkov G. M., Plesnetsov S. YU., Meshcheryakov S. YU., Yudanova N. N. Novyye razrabotki elektromagnitno-akusticheskikh preobrazovateley (obzor) [New developments of electromagnetic-acoustic transducers (review)] // Tekhnicheskaya diagnostika i nerazrushayushchiy kontrol' [Technical diagnostics and non-destructive testing]. 2018. – No 3. – P. 27–34.
7. Gordeliy V.I. Sovremennyye elektromagnitno-akusticheskiye preobrazovately dlya nerazrushayushchego kontrolya [Modern electromagnetic-acoustic converters for non-destructive testing] / V.I. Gordeliy, V.Ye.Chabanov // Tekhnicheskaya diagnostika i nerazrushayushchiy kontrol' [Technical diagnostics and non-destructive testing]. – 2005. – No 2. – P. 59–60.

Надійшло (received) 26.06.19

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

**Ноздрачова Катерина Леонідівна (Ноздрачева Екатерина Леонидовна, Nozdrachova Katerina Leonidivna)** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних та радіоелектронних систем контролю та діагностики, НТУ «ХПІ», м. Харків, Україна, ORCID ID: 0000-0002-1996-2301, e-mail: nozdrachova@gmail.com

**Ю. А. ПЛЕСНЕЦОВ**

### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОЧАГА ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ЗАМКНУТЫХ СВАРНЫХ ГНУТЫХ ПРОФИЛЕЙ**

При проектировании технологии производства замкнутых сварных гнутых профилей возможность определения основных параметров очага деформации (длину и форму на участке перед сварочной клетью), безусловно является фактором, который позволяет обеспечить стабильность и качество сварного шва. Параметры очага деформации позволяют рассчитать расстояние от шово-направляющей клетки до сварочной клетки, при котором обеспечиваются необходимые условия для осуществления процесса высокочастотной сварки (угол схождения кромок и очаг деформации профиля), что способствует повышению продольной устойчивости профиля. Это особенно важно при производстве тонкостенных профилей, наиболее подверженных волнообразованию на кромках, которое существенно затрудняет процесс образования сварного соединения или вообще исключает его возможность. В работе использован вариационный метод, основанный на принципе минимума энергии упругой деформации (минимума работы деформирования). В литературе нет данных и рекомендаций, которыми можно было бы воспользоваться при решении подобных задач. До последнего времени параметры профиля и конструкции оснастки, а также взаимное расположение формирующей и сварочной клеток определяли эмпирически. Результаты, полученные в работе, позволяют установить форму очага деформации профиля перед сваркой и обеспечивают необходимое расположение конструктивных элементов клеток, формы, а также размеры индукторов и ферритовых оправок.

**Ключевые слова:** профили замкнутые сварные, параметры очага деформации, расположение клеток, форма индукторов, форма ферритовых оправок.

**Ю.О. ПЛЕСНЕЦОВ**

### **ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ОСЕРЕДКА ДЕФОРМАЦІЇ ПРИ ВИРОБНИЦТВІ ЗАМКНУТИХ ЗВАРНИХ ГНУТИХ ПРОФІЛІВ**

При проектуванні технології виробництва замкнутих зварних гнутих профілів можливість визначення основних параметрів осередку деформації (довжини і форми на ділянці перед зварювальною кліткою), безумовно є фактором, який дозволяє забезпечити стабільність і якість зварного шва. Параметри осередку деформації дозволяють розрахувати відстань від шово-направляючої клітки до зварювальної клітки, при якому забезпечуються необхідні умови для здійснення процесу високочастотного зварювання (кут схождения кромок і осередок деформації профілю), що сприяє підвищенню подовжньої стійкості профілю. Це особливо важливо при виробництві тонкостінних профілів, найбільш схильних до хвилеутворення на крайках, яке істотно ускладнює процес утворення зварного з'єднання або взагалі виключає його можливість. У роботі використаний варіаційний метод, заснований на принципі мінімуму енергії пружної деформації (мінімуму роботи деформування). У літературі немає даних і рекомендацій, якими можна було б скористатися при вирішенні подібних задач. До останнього часу параметри профілю і конструкції оснастки, а також взаємне розташування формируючої і зварювальної клітей визначали емпірично. Результати, отримані в роботі, дозволяють встановити форму осередку деформації профілю перед зварюванням і забезпечують необхідне розташування конструкційних елементів клітей, форми, а також розміри індукторів і феритових оправок.

**Ключові слова:** профілі замкнуті зварні, параметри осередку деформації, розташування клітей, форма індукторів, форма феритових оправок.

**YU.A. PLESNETSOV**

### **DETERMINATION OF PARAMETERS OF THE DEFLECTION CENTER FOR THE PRODUCTION OF CLOSED WELDED BENDED PROFILES**

When designing the production technology of closed welded bent profiles, the ability to determine the main parameters of the deformation zone (length and shape in the area in front of the welding stand) is certainly a factor that ensures the stability and quality of the weld. The parameters of the deformation zone allow us to calculate the distance from the seam-guide stand to the welding stand, at which the necessary conditions for the high-frequency welding process (the angle of convergence of the edges and the profile deformation zone) are provided, which helps to increase the longitudinal stability of the profile. This is especially important in the production of thin-walled profiles, the most prone to wave formation at the edges, which greatly complicates the process of formation of a welded joint or even eliminates its possibility. The variational method based on the principle of the minimum energy of elastic deformation (minimum work of deformation) is used in the work. There are no data and recommendations in the literature that could be used to solve such problems. Until recently, the parameters of the profile and tooling design, as well as the relative position of the forming and welding stands, were determined empirically. The results obtained in this work allow us to establish the shape of the deformation zone of the profile before welding and provide the necessary arrangement of the structural elements of the stands, the shape, as well as the dimensions of the inductors and ferrite mandrels.

**Keywords:** closed welded profiles, parameters of the deformation zone, stand arrangement, shape of inductors, shape of ferrite mandrels

**Введение.** При проектировании технологии производства замкнутых сварных гнутых профилей возможность определения основных параметров очага деформации – таких, как длина и форма на участке перед сварочной клетью, безусловно является фактором, который позволяет обеспечить стабильность и качество сварного шва.

**Актуальность работы.** Параметры очага деформации позволяют рассчитать расстояние от шово-направляющей клетки до сварочной, при котором

обеспечиваются необходимые условия для осуществления процесса высокочастотной сварки (угол схождения кромок и очаг деформации профиля) [1, 2]. Последнее способствует повышению продольной устойчивости профиля. Это особенно важно при производстве тонкостенных профилей [3-9], наиболее подверженных волнообразованию на кромках, которое существенно затрудняет процесс образования сварного соединения или вообще исключает его возможность. В литературе нет данных и рекомендаций, которыми можно было бы

воспользоваться при решении подобных задач. До последнего времени параметры профиля и конструкции оснастки, а также взаимное расположение формующей и сварочной клетей определяли эмпирически.

**Цель работы** – установление формы свободного очага деформации профиля перед сваркой необходимо для обеспечения формы поперечного сечения профиля перед сваркой, расположения и формы конструктивных элементов клетей, формы и размеров индукторов, ферритовых оправок и т.п.

**Методика выполнения исследований.** Для достижения поставленной цели в работе использован вариационный метод, основанный на принципе минимума энергии упругой деформаций (минимума работы деформирования).

В работе на основе теории профилирования [1, 2] выделены основные виды упругих деформаций при обжатии профиля в сварочном калибре, вариационным методом получены выражения для определения энергии, необходимой для осуществления каждой из упругих деформаций, для полной упругой энергии деформации профиля в таком виде, чтобы они включали в себя неизвестную функцию, описывающую форму очага деформации, определен вид этой функции, соответствующий минимуму полной упругой энергии, и, тем самым установлена

форма очага деформации; после чего определены длина очага деформации и угол схождения кромок профиля.

В качестве допущения принято, что вследствие малости угловых перемещений элементов профиля при формовке их до конечного положения на участке перед сваркой (до  $6^\circ$ ) свободный очаг деформации образуется только в результате упругого формоизменения профиля.

**Результаты исследований.**

**1. Формоизменение профиля в очаге деформации.**

Формоизменение профиля при обжатии упрощенно можно представить следующим образом.

Под действием усилий  $P_1$  полки подгибаются вниз и затем стыкуются усилиями  $P_2$  (рис. 1, а). Предполагается, что усредненные радиусы закруглений  $R_1$  и  $R_2$  отличаются друг от друга. За пределами области приложения усилий  $P_1$  и  $P_2$  образуется свободный очаг деформации, характеризующийся длиной  $L$  и углом схождения кромок профиля  $\alpha$  (рис. 1, б). Изменение формы сечения профиля сопровождается незначительным продольным искривлением, которым можно пренебречь. Под действием моментов от внешних сил нижняя стенка профиля испытывает изгиб в поперечно-осевой плоскости (рис. 2).

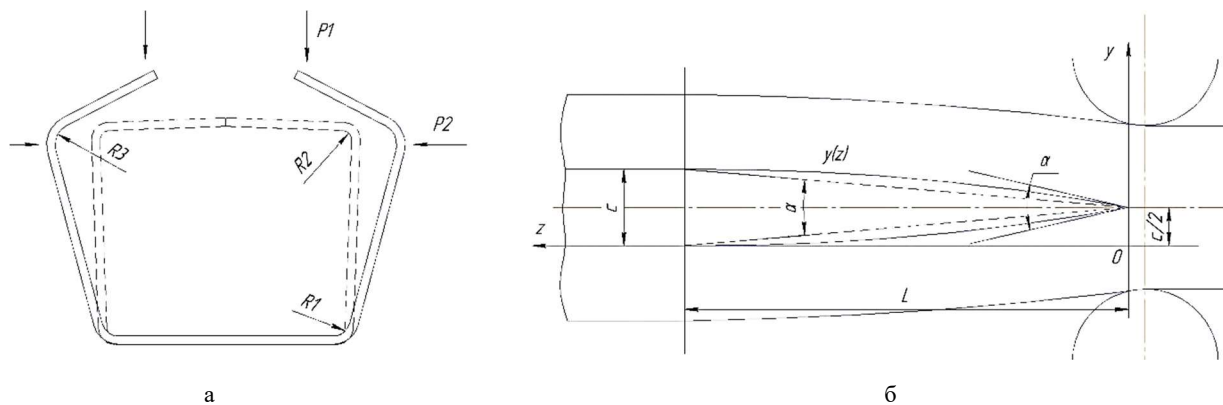


Рис. 1 – Характер формоизменения поперечного сечения профиля при обжатии: а – под действием усилий  $P_1$  полки подгибаются вниз и затем стыкуются усилиями  $P_2$ ; б – свободный очаг деформации (длиной  $L$  и углом схождения кромок профиля  $\alpha$ ) за пределами приложения усилий  $P_1$  и  $P_2$

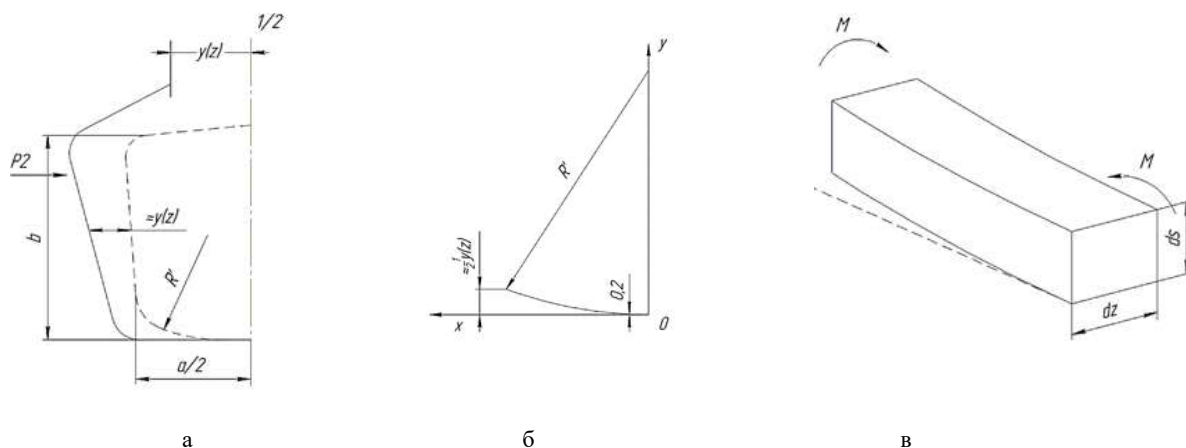


Рис. 2 – Расчетная схема для определения энергии упругого изгиба нижней стенки профиля: а – перемещение кромки на расстояние  $y(z)$  под действием усилия  $P_2$ ; б – показан изогнутый элемент нижней стенки с радиусом кривизны  $R'(z)$ ; в –



схема нижней стенки профиля в виде совокупности элементарных, балок прямоугольного сечения с площадью  $ds \cdot dz$ , изгибаемых моментом  $M$

Относительно боковых стенок с достаточной степенью точности можно принять, что при обжатии они перемещаются, сохраняя первоначальную форму, и, следовательно, испытывают преимущественно деформацию продольного растяжения. То же самое относится и к полкам, которые после подгибки вниз перемещаются навстречу друг другу.

Таким образом, в качестве основных видов упругого деформирования профиля перед сварочным калибром можно выделить **изгиб нижней стенки в поперечно-осевой плоскости** и **продольное растяжение боковых стенок и полок**, то есть задача сводится к получению выражений для указанных видов упругого деформирования профиля с учетом формы очага деформации, подлежащей определению.

## 2. Определение упругой энергии в очаге деформации.

**Энергия изгиба.** Схемы к расчету энергии упругого изгиба нижней стенки профиля, соответствующие изложенным выше упрощениям характера формоизменения, представлены на рис. 2 (ввиду симметрии сечения профиля рассматривается его половина). На рис. 1, б дана общая схема формирования очага деформации длиной  $L$  на полках профиля. Изменение расстояния между кромками по длине очага деформации и, следовательно, его форма характеризуются некоторой функцией  $y(z)$ , которая, как видно из рис. 1, б, удовлетворяет следующим граничным условиям:

$$y(z=0) = \frac{c}{2}, y(z=L) = 0, y'_z(z=L) = 0, \quad (1)$$

где  $c$  – первоначальная величина зазора между кромками профиля.

Третье из условий (1) означает отсутствие каких-либо особых точек по длине очага деформации, поскольку на этом участке не прикладывается никаких внешних усилий. Очевидно, что текущая величина зазора  $2\delta(z)$  связана с функцией  $y(z)$  следующим образом:

$$2\delta(z) = c - 2y(z); 2\delta(0) = 0; 2\delta(L) = c. \quad (2)$$

Из рис. 2, а следует, что перемещение кромки на расстояние  $y(z)$  под действием усилия  $P_2$  приводит к «жесткому» смещению боковой стенки и, соответственно, к изгибу нижней стенки до некоторого радиуса кривизны  $R'$  величина которого различна в разных сечениях очага деформации, то есть  $R'=R'(z)$ , причем  $R'(0)=R_{\min}$ ,  $R'(L)=\infty$ . Отсюда следует, что  $R'$  зависит от  $y(z)$  и в первом приближении  $R'(z) \sim [y(z)]^{-1}$ . На рис. 2, б показан изогнутый элемент нижней стенки с радиусом кривизны  $R'(z)$ . При небольшом искривлении нижней стенки дугу окружности радиуса  $R'$  приближенно можно представить отрезком параболы; из уравнения окружности  $x^2 + (R' - y)^2 = (R')^2$  (см. рис. 2, б)

$$y = R' - \sqrt{(R')^2 - x^2} = R' - R' \sqrt{1 - \frac{x^2}{(R')^2}} \approx R' - R' \left[ 1 - \frac{x^2}{2(R')^2} \right] = \frac{x^2}{2R'}. \quad (3)$$

Из приближенного геометрического соотношения (см. рис. 2, а и рис. 3) находим

$$y\left(\frac{a}{2}\right) \approx \frac{1}{2}y(z) = \frac{a^2}{8R'}.$$

Откуда

$$R' = R'(z) = \frac{a^2}{4y(z)}. \quad (4)$$

Представим теперь рассматриваемую половину нижней стенки профиля в качестве совокупность элементарных, балок прямоугольного сечения с площадью  $s \cdot dz$  (рис. 2, в), изгибаемых моментом  $M(z)$ . Согласно (4), в соответствии с известным соотношением для чистого изгиба

$$\frac{1}{R'} = \frac{M}{EI}, \quad (5)$$

где  $I$  – момент инерции сечения

$$I = \frac{s^3 dz}{12} \quad (6)$$

находим

$$\frac{M(z)}{EI} = \frac{4y(z)}{a^2}. \quad (7)$$

Используя известную формулу для энергии упругого изгиба

$$U_{\text{изг}} = \int_{(l)} \frac{M^2 dl}{2EI}, \quad (8)$$

получим выражение для энергии изгиба элемента стенки в виде

$$dU_{\text{изг}} = \frac{M^2(z)l}{2EI} = \frac{M^2(z)a}{4EI} = \frac{M^2 z a}{EI} \cdot \frac{4y(z)}{a^2} \cdot \frac{a}{4} \\ 4EI \frac{y(z)}{a^2} = \frac{4E}{a^3} y^2(z) \frac{s^3 dz}{12} = \frac{1}{3} \left(\frac{s}{a}\right)^2 E y^2(z) dz. \quad (9)$$

Тогда энергия упругой деформации изгиба для всей половины нижней стенки определяется формулой

$$U_{\text{изг}} = \int_0^L \frac{1}{3} \left(\frac{s}{a}\right)^2 E y^2(z) dz = \frac{1}{3} \left(\frac{s}{a}\right)^2 E \int_0^L y^2(z) dz \quad (10)$$

в которую входит неизвестная функция  $y(z)$ , описывающая форму очага деформации.

**Энергия деформаций растяжения.** Основной вклад в эту деформацию составляет растяжение отдельных элементов с площадью сечения  $F=s \cdot db$  (рис. 3, а); искривлением их в первом приближении можно пренебречь. Для наглядности удлинение этих элементов показано также в плане (рис. 3, б). В упругой зоне, согласно закону Гука, относительное удлинение

$$\frac{\Delta dz}{dz} = \frac{N}{EF}, \quad (11)$$

где  $N$  – нормальное усилие, направленное вдоль элемента.

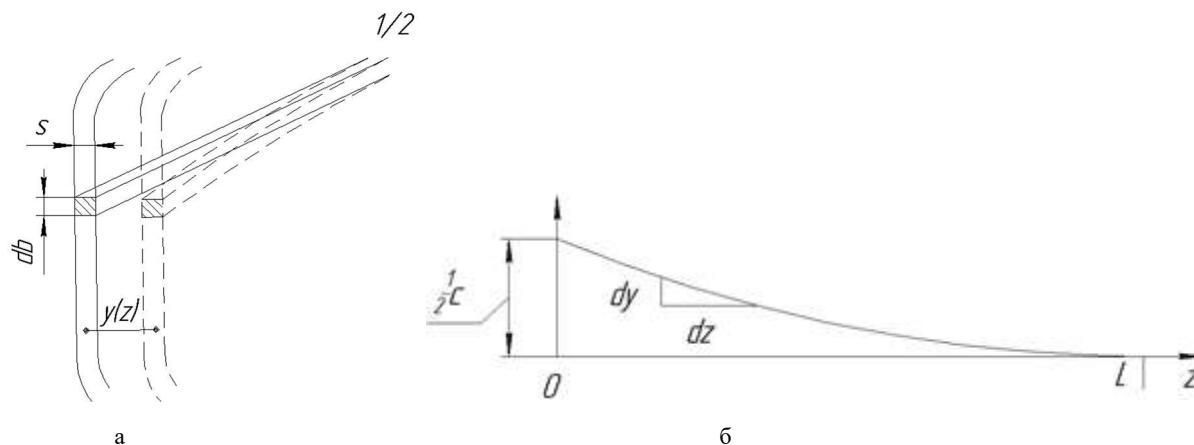


Рис. 3 – Расчетная схема упругого растяжения боковой стенки: а – растяжение отдельных элементов (площадь сечения  $F=s \cdot db$ ); б – растяжение при  $\frac{dy}{dz} \ll 1$

Согласно рис. 3, б (при  $\frac{dy}{dz} \ll 1$ ) можно приближенно записать

$$\frac{\Delta dz}{dz} = \frac{\sqrt{dy^2 + dz^2} - dz}{dz} = \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dz}\right)^2} - 1 = \sqrt{1 + (y'_z)^2} - 1 \approx 1 + \frac{1}{2}(y'_z)^2 - 1 = \frac{1}{2}(y'_z)^2. \quad (12)$$

Используя известные соотношения теории упругости, можно определить энергию упругой деформации растяжения элемента боковой стенки:

$$dU_{\text{раст}}^{\text{б.ст}} = \int_0^L \frac{N^2 dz}{2EF} = \int_0^L \frac{N}{EF} \frac{N}{2} dz = \int_0^L \frac{\Delta dz}{dz} \frac{1}{2} EF \frac{\Delta dz}{dz} dz = \int_0^L \left[\frac{1}{2}(y'_z)^2\right]^2 \frac{1}{2} Esdb dz = \frac{1}{8} Esdb \int_0^L (y'_z)^4 dz. \quad (13)$$

При допущении о «жестком» перемещении боковой стенки при (интегрировании по ее высоте), получаем

$$\int_0^b db = b,$$

откуда энергия деформации боковой стенки составит

$$U_{\text{раст}}^{\text{б.ст}} = \frac{1}{8} Esdb \int_0^L (y'_z)^4 dz. \quad (14)$$

Аналогичным способом определяем энергию деформации полки.

Для этой цели выделяем отдельные элементы с площадью поперечного сечения  $s \cdot da$  (рис. 4). Расчетная схема (см. рис 3, б) применима и в данном случае. Обозначив ширину полки через  $\frac{a}{2}$ , по аналогии с (11-14) определяем энергию упругого растяжения полки

$$U_{\text{раст}}^{\text{п}} = \frac{1}{8} Es \frac{a}{2} \int_0^L (y'_z)^4 dz. \quad (15)$$

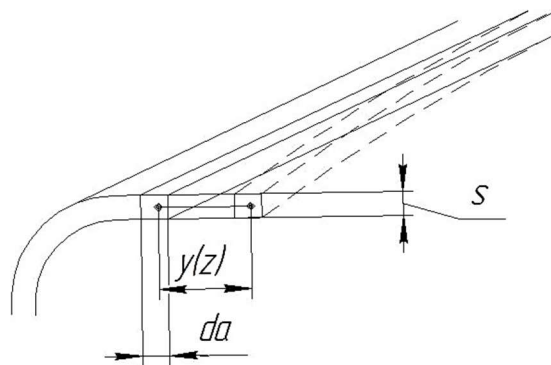


Рис. 4 – Расчетная схема для определения энергии упругого растяжения полки

Суммарная энергия растяжения боковой стенки и полки

$$U_{\text{раст}} = \frac{1}{8} Es \left(\frac{a}{2} + b\right) \int_0^L (y'_z)^4 dz. \quad (16)$$

**Полная упругая энергия в очаге деформации.**

Суммируя (10) и (16), получаем формулу для определения полной энергии упругой деформации рассматриваемой половины профиля

$$U = \frac{1}{3} \left(\frac{s}{a}\right)^3 E \int_0^L y^2(z) dz + \frac{1}{8} Es \left(\frac{a}{2} + b\right) \int_0^L (y'_z)^4 dz. \quad (17)$$

В это выражение входит неизвестная функция  $y(z)$ , описывающая форму очага деформации; она подлежит определению путем отыскания минимума функционала (17).

### 3. Определение формы очага деформации.

Для удобства выполнения дальнейших расчетов представим (17) в виде

$$U = \int_0^L [K_1 y^2 + K_2 (y'_z)^4] dz, \quad (18)$$

где  $K_1 = \frac{1}{3} \left(\frac{s}{a}\right)^3 E$ ;

$$K_2 = \frac{1}{8} Es \left(\frac{a}{2} + b\right). \quad (19)$$

Задача состоит в нахождении функции  $y(z)$ , при котором величина полной энергии деформации  $U$  будет соответствовать минимуму.

Функционал  $\int_a^b F(x; y; y') dx$  стремится к минимуму, если функция удовлетворяет уравнению Эйлера

$$Fy - \frac{d}{dx} Fy' = 0.$$

Если  $F$  не содержит  $x$ , то это уравнение включает первый интеграл:

$$F - y'Fy' = const.$$

В рассматриваемом случае это соотношение принимает вид

$$K_1 y^2 + K_2 (y')^4 - y' \cdot 4K_2 (y')^3 = const, \quad (20)$$

или

$$K_1 y^2 - 3K_2 (y')^4 = const. \quad (21)$$

При третьем из граничных условий (1), а именно  $y'=0$  при  $y=0$ ,  $const$  обращается в нуль, поэтому (21) можно привести к виду

$$K_1 y^2 = 3K_2 (y')^4. \quad (22)$$

Отсюда получаем дифференциальное уравнение для функции  $y(z)$

$$y' = \frac{dy}{dx} = -\sqrt[4]{\frac{K_1}{3K_2}} \sqrt{y}. \quad (23)$$

Знак «минус» выбираем из очевидного требования  $y' < 0$ . Решение этого уравнения, с учетом

граничных условий (1), обеспечило получение функции вида

$$\sqrt{y(z)} = \sqrt{\frac{c}{2} - \frac{1}{2} \sqrt{\frac{K_1}{3K_2}}} z. \quad (24)$$

Тем самым описание формы очага деформации (см. рис. 1, б) может быть представлено в виде функции  $y(z)$ .

### 4. Определение длины очага деформации.

Из условия (1), а именно  $y(z=L)=0$ , и (24), получаем:

$$\sqrt{\frac{c}{2} - \frac{1}{2} \sqrt{\frac{K_1}{3K_2}}} L = 0. \quad (25)$$

Отсюда длина очага деформации

$$L = \sqrt{2c} \cdot \sqrt[4]{\frac{3K_2}{K_1}}. \quad (26)$$

Подставляя значения  $K_1$  и  $K_2$  (согласно (19)), окончательно получим

$$L = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{6c}{s}} \sqrt[4]{a^3(a+2b)}. \quad (27)$$

В частности, для профиля квадратного сечения ( $b=a$ ), получаем зависимость вида

$$L = \frac{\sqrt[4]{3}}{2} a \sqrt{\frac{6c}{s}}. \quad (28)$$

Приближенно длину очага деформации можно определять по зависимости

$$L \approx \frac{1}{\sqrt{s}}.$$

Замеры длины очага деформации при освоении замкнутого сварного профиля 80x80x0,8 мм при  $c=4$  мм показали численное значение  $L \approx 310$  мм (рис. 5). Расчетное значение длины очага деформации по формуле (28) для указанного профиля составляют  $L \approx 290$  мм (расхождение  $\approx 7\%$ ), что приемлемо для практического использования.



Рис. 5 – Замкнутый сварной профиль 80x80x0,8 мм

### 5. Определение угла схождения кромок

Поскольку угол схождения кромок, как правило, мал, расчет проведен следующим образом: введя

текущую величину зазора  $2\delta(z)$  и используя выражения (2) и (24), получим

$$\delta(z) = \frac{c}{2} - \left( \sqrt{\frac{c}{2}} - \frac{1}{2} c_0 z \right)^2 = \sqrt{\frac{c}{2}} c_0 z - \frac{c_0^4}{4} z^2, \quad (29)$$

$$\text{где } c_0 = \sqrt[4]{\frac{K_1}{3K_2}}. \quad (30)$$

Величина  $\left. \frac{d\delta(z)}{dz} \right|_{z=0}$  позволяет получить

зависимость  $\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}$  или, ввиду малости угла

$$\alpha \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \approx \frac{\alpha}{2}.$$

Учитывая (29), находим зависимость для определения угла схождения кромок

$$\frac{\alpha}{2} \approx \left. \frac{d\delta(z)}{dz} \right|_{z=0} = \left( \sqrt{\frac{c}{2}} c_0 - \frac{c_0^2}{2} z \right) \Big|_{z=0} = \sqrt{\frac{c}{2}} c_0, \quad (31)$$

откуда

$$\alpha = 2 \sqrt{\frac{c}{2}} c_0 = \sqrt{2c} \cdot c_0. \quad (32)$$

Из (26) и (30)

$$c_0 = \sqrt[4]{\frac{K_1}{3K_2}} = \frac{\sqrt{2c}}{L}. \quad (33)$$

Решая совместно (33) и (32), получим

$$\alpha \approx \frac{2c}{L}. \quad (34)$$

Отношение  $\frac{c}{L}$  определяет угол схождения, который соответствует линейной форме очага деформации. С учетом изложенного, формула (34) принимает вид

$$\alpha = 2\bar{\alpha};$$

$$\bar{\alpha} = \frac{c}{L}. \quad (35)$$

### Выводы

1. При разработке технологии производства новых сварных замкнутых гнутых профилей по заданным параметрам их сечений перед сваркой необходимо определить длину и форму очага деформации, что обеспечит обоснованный выбор расстояния от шовнаправляющей (перемещаемой) клетки до сварочной (неподвижной) клетки при условии обеспечения стесненного очага деформации (длиной  $\approx 10\%$  меньше длины очага деформации).

2. Полученная зависимость (24) позволяет определить форму сечения профиля на участке установки индуктора и оптимальные размеры внутреннего (рабочего) пространства последнего. Что обеспечивает устранение потерь времени на

настройку профилегибочного оборудования. Проектируемая в рассматриваемом случае технологическая оснастка имеет оптимальные характеристики, что повышает коэффициент полезного действия и стабильность процесса.

### Список литературы

1. Тришевский И.С., Докторов М.Е. Теоретические основы процесса профилирования. – Москва: Металлургия, 1980. – 288 с.
2. Гун Г.Я. Теоретические основы обработки металлов давлением (теория пластичности). – Москва: Металлургия, 1980. – 456 с.
3. Тришевский И.С. Калибровка валков для производства гнутых профилей проката / И.С. Тришевский, В.И. Мирошниченко, В.П. Стукалов и др. – Киев: Техника, 1980. – 168 с.
4. Тришевский И.С. Производство гнутых профилей. Оборудование и технологии. / И.С. Тришевский, А.Б. Юрченко, В.С. Марьин и др. – Москва: Металлургия, 1982. – 384 с.
5. Тришевский И.С., Клепанда В.В. Металлические облегченные конструкции. – Киев: «Будівельник», 1978. – 112 с.
6. Тришевский И.С. Гнутые профили проката. Справочник / И.С. Тришевский, В.И. Мирошниченко, В.П. Стукалов и др. – Москва: Металлургия, 1980. – 352 с.
7. Тришевский И.С. Производство деталей из гнутых профилей / И.С. Тришевский, В.С. Марьин, В.А. Хмель. – Киев: Техника, 1985. – 128 с.
8. Roll forming handbook / Edited by George T. Halmos. – Boca Raton, London, New York: Taylor & Francis Group, 2006. – 573 p.
9. Марковцев В.А. Формообразование стесненным изгибом в роликках и правка гнутых тонкостенных профилей / В.А. Марковцев, В.И. Филимонов. – Ульяновск: УлГТУ, 2006. – 244 с.

### References (transliterated)

1. Trishevskij I.S. Kalibrovka valkov dlya proizvodstva gnutyh profilej prokata / I.S. Trishevskij, V.I. Miroshnichenko, V.P. Stukalov i dr. – Kiev: Tehnika, 1980. – 168 p.
2. Trishevskij I.S. Proizvodstvo gnutyh profilej. Oborudovanie i tehnologii. / I.S. Trishevskij, A.B. Yurchenko, V.S. Marin i dr. – Moskow: Metallurgiya, 1982. – 384 p.
3. Trishevskij I.S., Doktorov M.E. Teoreticheskie osnovy processa profilirovaniya. – Moskow: Metallurgiya, 1980. – 288 p.
4. Trishevskij I.S. Gnutye profili prokata. Spravochnik / I.S. Trishevskij, V.I. Miroshnichenko, V.P. Stukalov i dr. – Moskow: Metallurgiya, 1980. – 352 p.
5. Trishevskij I.S. Proizvodstvo detalej iz gnutyh profilej / I.S. Trishevskij, V.S. Marin, V.A. Hmel. – Kiev: Tehnika, 1985. – 128 p.
6. Rashnikov V.F. Proizvodstvo gnutyh profilej na Magnitogorskom metkombinate / V.F. Rashnikov, M.F. Safronov, V.L. Kornilov i dr. – Magnitogorsk: MGTU, 1999. – 157 p.
7. Safronov M.F. Proizvodstvo i ekspluatatsiya valkov na metallurgicheskom predpriyatii / M.F. Safronov, V.G. Antipanov, V.L. Kornilov i dr. – Magnitogorsk: MGTU, 1999. – 92 s.
8. Roll forming handbook / Edited by George T. Halmos. – Boca Raton, London, New York: Taylor & Francis Group, 2006. – 573 p.
9. Filimonov S.V. Intensivnoe formoobrazovanie gnutyh profilej / S.V. Filimonov, V.I. Filimonov. – Ulyanovsk: UIGTU, 2008. – 444 p.
10. Filimonov S.V. Metod, raschety i tehnologiya intensivnogo deformirovaniya v rolrikah gnutyh profilej tipovoj nomenklatury / S.V. Filimonov, V.I. Filimonov. – Ulyanovsk: UIGTU «Venec», 2004. – 246 p.
11. Markovcev V.A. Formoobrazovanie stesennym izgiбом v rolrikah i pravka gnutyh tonkostennyh profilej / V.A. Markovcev, V.I. Filimonov. – Ulyanovsk: UIGTU, 2006. – 244 p.

Поступила (received) 18.10.2019

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

**Плеснецов Юрий Александрович (Плеснецов Юрий Александрович, Plesnetsov Yuriy Aleksandrovich)** – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, професор кафедри «Комп'ютерні та радіоелектронні системи контролю та дівгностики», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна, e-mail: plesnetsov@gmail.com

УДК 621.7.043

*Р. Г. ПУЗЫРЬ, Р. В. ЛЕВЧЕНКО, Ю. Б. СИРА, С. Н. ЛЕЛЮХ***ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОТЕРИ УСТОЙЧИВОСТИ ТРУБНОЙ ЗАГОТОВКИ ПРИ РАЗДАЧЕ СОЕДИНИТЕЛЬНЫХ ПЕРЕХОДНИКОВ**

Приводятся результаты конечно-элементного моделирования процесса раздачи трубной заготовки коническим пуансоном. Показано, что задача получила широкое распространение в инженерной практике и предназначена для увеличения диаметра любой части цилиндрической заготовки, применяется для приращения диаметра концов труб, которые выступают в роли соединительных элементов топливной, теплообменной и воздушной трубопроводных систем автомобилей, судов и сельскохозяйственной техники. Приведены эмпирические критерии потери устойчивости заготовки с образованием поперечной кольцевой складки. Процесс моделировался согласно данным критериям для визуализации потери устойчивости и проверки работоспособности данной модели. Было сделано предположение, что потеря устойчивости заготовки во время раздачи вблизи участка свободного изгиба объясняется действием изгибающих моментов на границе этого участка, способствующих увеличению диаметра заготовки. На их величину значительное влияние оказывает геометрия инструмента (угол конуса пуансона), условия трения на контактом участке между инструментом и заготовкой и геометрические характеристики оболочки. Также проводились измерения зоны начала возникновения гофры и результаты сравнивались с существующими методами расчета. Данные исследования показали не достаточную правомерность аналитической модели для прогнозирования складкообразования. Установлено, что применяемые в инженерной практике критерии потери устойчивости второго вида удовлетворительно согласуются с результатами данного моделирования, а значит задача в такой постановке и численный расчет может быть вполне адаптирован для анализа напряженно-деформированного состояния аналогичных процессов формообразования. Вопрос о преимущественном влиянии изгибающего момента, действующего в меридиональном направлении, на возникновение поперечной гофры остается открытым и требует дальнейших исследований.

**Ключевые слова:** раздача, цилиндрическая заготовка, пластическая деформация, увеличение диаметра, моделирование, складкообразование.

*Р. Г. ПУЗИР, Р. В. ЛЕВЧЕНКО, Ю. Б. СИРА, С. М. ЛЕЛЮХ***ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВТРАТИ СТІЙКОСТІ ТРУБНОЇ ЗАГОТОВКИ ПРИ РОЗДАВАННІ З'ЄДНУВАЛЬНИХ ПЕРЕХОДІВ**

Проводяться результати скінечно-елементного моделювання процесу роздавання трубної заготовки конічним пуансоном. Показано, що задача отримала широке розповсюдження в інженерній практиці та призначена для збільшення діаметру будь-якої частини циліндричної заготовки, використовується для приращення діаметру кінців труб, які виступають у ролі з'єднувальних елементів паливної, паливо обмінної та повітряної трубопроводних систем автомобілів, судин та сільськогосподарської техніки. Приведені емпіричні критерії втрати стійкості заготовки з утворенням поперечної кільцевої складки. Процес моделювався згідно даним критеріям для візуалізації втрати стійкості та перевірки працездатності даної моделі. Було зроблене припущення, що втрата стійкості заготовки під час роздачі поблизу ділянки вільного згину, пояснюється дією згинаючих моментів на кордоні цієї ділянки, що сприяє збільшенню діаметру заготовки. На їх величину значно впливає геометрія інструменту (кут конусу пуансона), умови тертя на контактній ділянці між інструментом та заготовкою та геометричні характеристики оболонки. Також проводилися вимірювання зони початку виникнення гофри та результати порівнювалися з існуючими методами розрахунку. Дані дослідження показали не достатню правомірність аналітичної моделі для прогнозування складкоутворення. Встановлено, що критерії втрати стійкості другого виду, що використовуються в інженерній практиці, задовільно узгоджуються з результатами даного моделювання, а значить задача в такій постановці та чисельний розрахунок можуть бути адаптовані для аналізу напружено-деформованого стану аналогічних процесів формоутворення. Питання про переваги впливу згинаючого моменту, що діє в меридіональному напрямку, на виникнення поперечної гофри залишається відкритим та потребує подальших досліджень.

**Ключові слова:** роздавання, циліндрична заготовка, пластична деформація, збільшення діаметру, моделювання, складкоутворення.

*R. PUZYR, R. LEVCHENKO, Y. SIRAYA, O. PEDUN***NUMERICAL SIMULATION OF LOSS SUSTAINABILITY OF PIPE PROCESSING AT THE DISTRIBUTION OF CONNECTING ADAPTERS**

Results of finite-element simulation of process of pipe blank distribution with conical punch are given. It has been shown that distribution has become widespread in engineering practice and is intended to increase the diameter of any part of the cylindrical blank, is used to increment the diameter of pipe ends, which act as connecting elements of fuel, heat exchange and air pipeline systems of automobiles, ships and agricultural machinery. Empirical criteria of billet stability loss with formation of transverse circular fold are given. The process was modeled according to these criteria to visualize the loss of stability and verify the operability of the model. It has been suggested that the loss of stability of the workpiece during dispensing in the vicinity of the free bend portion is due to the action of bending moments at the boundary of that portion contributing to the increase in the diameter of the workpiece. Their magnitude is significantly influenced by tool geometry (punch cone angle), friction conditions at the contact area between the tool and workpiece, and shell geometric characteristics. There were also measurements of the area where the corrugation began and the results were compared with existing calculation methods. These studies showed insufficient validity of the analytical model for prediction of folding formation. It has been established that the stability loss criteria of the second type used in engineering practice are satisfactorily consistent with the results of this simulation, and therefore the task in such a setting and numerical calculation can be quite adapted for analysis of stress-deformed state of similar forming processes. The question of the advantageous effect of the bending moment acting in the meridian direction on the occurrence of the transverse corrugation remains open and requires further research.

**Key words:** Distribution, cylindrical blank, plastic deformation, diameter increase, simulation, folding.

**Введение.** Раздача, как процесс холодной листовой штамповки, получила широкое распространение в инженерной практике и предназначена для увеличения диаметра любой части цилиндрической заготовки. Однако, в основном ее

применяют для приращения диаметра концов труб, которые выступают в роли соединительных элементов топливной, теплообменной и воздушной трубопроводных систем автомобилей, судов и сельскохозяйственной техники. В качестве

© Р. Г. Пузырь, Р. В. Левченко, Ю. Б. Сира, С. Н. Лелюх. 2019

дополнительного перехода при профилировании стальных ободьев колес, изготовлении оборудования бытового назначения, транспортных конвейерных систем сыпучих, штучных и жидких продуктов, для изготовления баллонов, емкостей, сепараторов нефтехимической и пищевой промышленности [1 – 5]. При этом в большинстве технологических процессов используется инструментальная оснастка, которая характеризуется своей простотой и доступностью в материальном оформлении [5, 6].

Увеличение диаметра центральной части трубной заготовки возможно путем применения специальной оснастки и способов, основанных на динамической штамповке (использование энергии взрыва, магнитно-импульсная штамповка и электрогидроштамповка), а также на штамповке деформируемыми средами (свинец, олово, алюминий, гранулированный материал, жидкость, резина полиуретан и т.д.) [6, 7 – 11]. Данные процессы раздачи используются в единичном и мелкосерийном производстве и не находят широкого применения в более крупных масштабах из-за длительности подготовительных работ (штамповка взрывом), необходимости в специальных навыках персонала (штамповка взрывом, магнитно-импульсная штамповка, электрогидроштамповка), сложности и громоздкости оборудования (магнитно-импульсная штамповка, электрогидроштамповка, штамповка жидкостью), наличия больших производственных площадей (штамповка взрывом), быстрого износа оснастки (штамповка резиной и полиуретаном), а также не возможности создания больших удельных давлений (штамповка деформируемыми средами – свинец, олово, алюминий).

**Цель работы.** Определить конечно-элементным моделированием зону потери устойчивости трубной заготовки в процессе раздачи, выявить наиболее значимые факторы процесса, устраняющие данное явление и сравнить полученные результаты с существующими аналитическими решениями.

**Изложение основного материала.** Конечно-элементное моделирование проводилось в программном комплексе Simulia Abaqus – student edition, который предоставляется инженеринговой компанией «ТЕСИС» в качестве ознакомительного и отличается от профессиональных версий ограниченным количеством узлов конечно-элементной модели. Заготовка представляла собой цилиндр с толщиной стенки 3,0 мм, диаметром – 80 мм и высотой – 250 мм. Геометрические размеры пуансона: высота – 50 мм, диаметр нижнего основания – 74 мм, верхнего – 140 мм, угол наклона образующей усеченного конуса составил 34°. Заготовка устанавливалась вертикально, а для имитации жесткого горизонтального основания к нижнему торцу заготовки прикладывали граничное условие «encastre» – т.е. ограничение смещений и поворотов по всем степеням свободы. Пуансон восстанавливался сверху на цилиндр, до совмещения внутренней поверхности торца заготовки с торцом усеченного конуса. Задавали тип взаимодействия между внутренними стенками цилиндра и внешними

инструмента методом механических ограничений в виде кинематических контактных с конечной формулировкой скольжения. Свойства контакта определяли, как нормальные и тангенциальные с коэффициентом трения равным 0,25. Т.е. моделировали, что на поверхность заготовки и пуансона нанесен слой жидкой смазки. Инструмент ограничивали по всем степеням свободы, кроме смещения вдоль оси заготовки, что обеспечило необходимое давление для создания пластических деформаций. Граничным условием, необходимым для раздачи, также являлась возможность смещений и поворотов верхнего торца заготовки и ее цилиндрической поверхности по всем направлениям, кроме поворота вокруг собственной оси. Задача осесимметричная, поэтому рассматривали половину заготовки и, соответственно, прямолинейные стороны заготовки закрепили также от смещения в направлении отсеченной части цилиндра, гарантируя тем самым совместность деформаций.

Задачу решали в 3D постановке, поэтому заготовку назначили деформированным твердым телом, которое получено выдавливанием полукольца на глубину 250 мм. Инструмент представлял собой твердое недеформируемое тело в виде облоочки, созданное вращением усеченного конуса на угол 180°.

Материал заготовки обладал следующими механическими характеристиками: плотность – 7800 кг/м<sup>3</sup>, предел текучести – 230 МПа, предел прочности – 320 МПа, коэффициент Пуассона – 0,28, упрочнение материала заготовки аппроксимировалось зависимостью –  $\sigma_{0,2} = 230 + 3,46\varepsilon^{0,6}$  [12, 13]. Металл, используемый в листовой штамповке имеет начальную анизотропию механических свойств, которая оказывает, в основном, негативное влияние на процесс деформации и устойчивость формообразования. Поэтому, принимали допущение, что материал заготовки обладает цилиндрической начальной анизотропией, приобретенная в процессе деформации анизотропия не учитывается, а его упрочнение согласуется с изотропной гипотезой. Материал несжимаем, а эффект Баушингера не учитывается. Цилиндрическую анизотропию задавали инженерными константами в направлении главных осей анизотропии –  $E_x=196$  ГПа;  $E_z=196$  ГПа – по толщине металла,  $E_y=270$  ГПа – в направлении оси;  $G_x= G_z= G_y=78$  ГПа [14, 15].

Генерирование сетки конечных элементов проводилось в автоматическом режиме программы, где из предложенных методов построения для инструмента был выбран свободный, с твердотельным четырехугольным типом элемента R3D4, который содержится в стандартном наборе модуля. Сетку для заготовки формировали линейным порядком построения из 8 узловых линейных прямоугольных элементов типа C3D8R, содержащихся в стандартной библиотеке и работающих во всех направлениях по объему материала. Сборка модели в начальном положении пуансона с сеткой элементов и координатными осями показана на рис. 1.



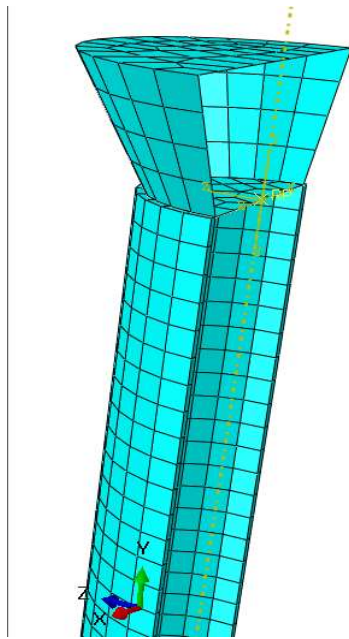


Рис. 1 – Конечно-элементная сборка заготовки и пуансона на начальном этапе моделирования процесса раздачи

Для того, чтобы пуансон в процессе вертикального перемещения опустился на всю высоту, равную 50 мм, запланировали время счета 300 сек., со скоростью движения инструмента 0,3 мм/сек. Это даст возможность получить коэффициент раздачи  $k_p=1,75$ .

**Обсуждение результатов.** Основным критерием, на котором основываются большинство технологических процессов раздачи, является эмпирический критерий устойчивости Аверкиева Ю.А.

$\frac{S_0}{D_0} \cdot 100 > 2.5 \dots 3.0$  [16, 17]. Заготовка с такими параметрами должна деформироваться с возникновением складки в поперечном направлении в зоне передачи усилия. Однако дополнительно к приведенному выше критерию необходимо учесть предельный коэффициент раздачи, который зависит от угла конусности пуансона, механических характеристик металла и коэффициента трения [16]

$$k_{pn} = \sqrt{\frac{2,2\varphi_y \sigma_m}{\sigma_s (1 + \mu \operatorname{ctg} \alpha)(3 - 2 \cos \alpha)}} + 1. \quad (1)$$

где  $\sigma_m$  – предел текучести металла;

$$\varphi_y = \frac{\sigma_{кр}}{\sigma_m};$$

$\sigma_s$  – предел прочности металла;

$\sigma_{кр}$  – критическое напряжение, вызывающее складкообразование;

$\alpha$  – угол конусности пуансона.

Для данных начальных условий эти требования выглядят следующим образом:  $\frac{3}{80} \cdot 100 = 3,75$ ;

$$k_{pn} = \sqrt{\frac{2,2 \cdot 1 \cdot 230}{320 \cdot (1 + 0,25 \operatorname{ctg} 34)(3 - 2 \cos 34)}} + 1 = 1,363.$$

Таким образом, заготовка для моделирования подбиралась так, чтобы в процессе деформации возникла складка в зоне передачи усилия (рис. 2).

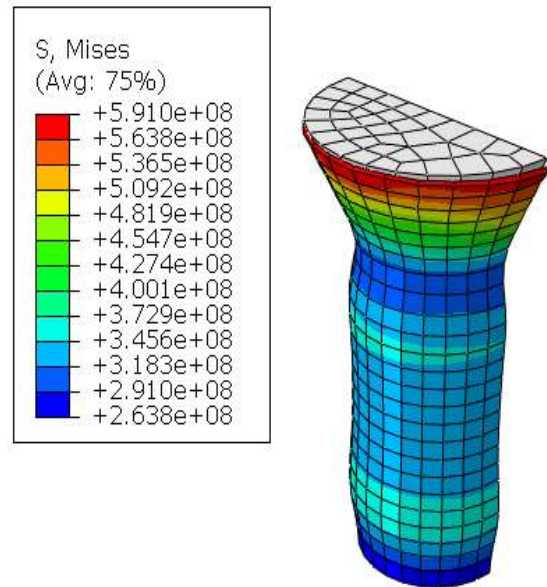


Рис. 2 – Раздача переходника с образованием поперечных складок

Однако на рис. 2 показана конечная стадия процесса, где коэффициент раздачи равен  $k_p=1,75$ . Предельные коэффициенты раздачи для данных геометрических характеристик пуансона и заготовки с заданными механическими свойствами материала рекомендуется выбирать в пределах до  $k_p=1,43$  [18]. Что практически совпадает с выше приведенными расчетами. На рис. 3 изображено положение пуансона на 165 секунде счета, что соответствует его внедрению в заготовку на глубину 25 мм. При этом визуально можно убедиться о формировании места будущего гофра. Здесь коэффициент раздачи составил  $k_p=1,33$ , т. е. практически равный предельному, рассчитанному по зависимости (1).

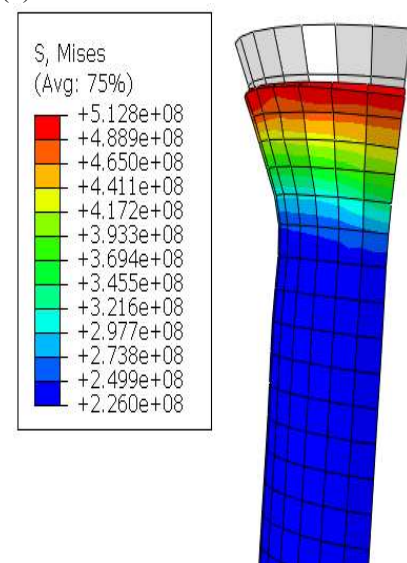


Рис. 3 – Внедрение пуансона в заготовку на промежуточном этапе расчета

Также, ранее были получены зависимости для определения границы возникновения гофра при раздате коническим пуансоном [17, 19–22]. Решения основывались на положениях технической теории оболочек вращения, ее допущениях и осесимметричности процесса деформирования:

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

где  $r$  – радиус заготовки,

$$\beta = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2rs}};$$

$R$  – радиус инструмента;

$E$  – модуль Юнга;

$l$  – протяженность конического участка заготовки.

Для принятых условий деформирования значение данного параметра равно – (рис. 4).

$$a = \ln \frac{\sqrt{2 \cdot 0,04 \cdot 0,003}}{\sqrt{3}} \left( \frac{(0,053 - 0,04) 210 \cdot 10^9}{0,04 \cdot 210 \cdot 10^6 \left( 1 - \frac{3}{2} \frac{0,03^2}{0,04^2} \right)} - 1 \right) = 9,8 \text{ мм}$$

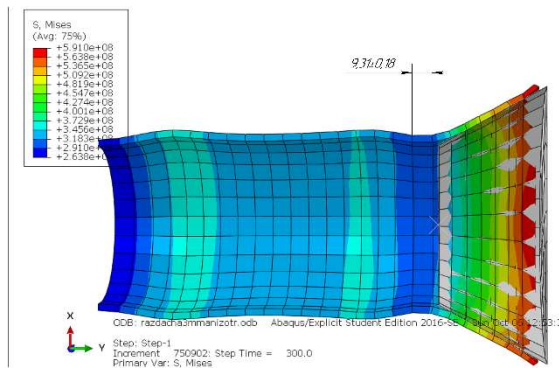


Рис. 4 – Значение параметра  $a$  на конечно-элементной сборке

Приведенный пример показывает практически точное совпадение результатов расчета по зависимости (2) и конечно-элементной модели. Это говорит об адекватности формулы (2) и правильности принятых допущений и гипотез при ее формировании. Основным допущением здесь было влияние изгибающего момента на потерю устойчивости с образованием гофра. Момент, действующий на участке свободного изгиба, оказывает влияние на возникновение поперечной складки, однако моментная нагрузка носит быстро затухающий характер [17, 23 – 26]. Однако, эта формула не дает пояснений об природе появления второго гофра, который расположен у основания заготовки. (рис. 4, рис. 1). Если, как предположено вышеупомянутыми авторами, появление складки связано не только с критическим напряжением, равным пределу текучести материала заготовки, но и

изгибающим моментом, действующим в зоне свободного изгиба, то у основания данный момент отсутствует, так как зависит от множителя  $e^{-kx}$ . Этот множитель и определяет быстроту его затухания [17, 26, 27].

**Выводы.** Таким образом, в результате конечно-элементного моделирования процесса раздачи трубной заготовки установлено, что применяемые в инженерной практике критерии потери устойчивости второго вида удовлетворительно согласуются с результатами данного моделирования, а значит задача в такой постановке и численный расчет может быть вполне адаптирован для анализа напряженно-деформированного состояния аналогичных процессов формообразования. Вопрос о преимущественном влиянии изгибающего момента, действующего в меридиональном направлении, на возникновение поперечного гофра остается открытым и требует дальнейших исследований.

#### Список литературы

1. Бужилов А.Л. Разработка альтернативной технологии производства наружного элемента капсулы для заготовок пустотелых турбокомпрессорных валов из гранул. *Технология легких сплавов*, 2009. №2. – С. 57–62.
1. Puzyr, R., T. Haikova, J. Majernik, M. Karkova, J. Kmec. Experimental Study of the Process of Radial Rotation Profiling of Wheel Rims Resulting in Formation and Technological Flattening of the Corrugations. *Manufacturing Technology*, 2018. No 18 (1), pp. 106–111.
2. Мосьпан Д. В., Драгобецкий В. В., Пузырь Р. Г. Определение потребного крутящего момента при радиально-ротационном профилировании ободьев колес. *Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського*. Кременчук: КДПУ, 2008. Вип. 6 (53), частина 2. – С. 64–66.
3. Maslov A., Batsaikhan J., Puzyr R., Salenko Y. The determination of the parameters of a vibration machine for the internal compaction of concrete mixtures. *International Journal of Engineering & Technology*, 2018, Vol. 7, No. 4.3, – pp. 12–19.
4. Калюжний В. Л., Запороженко А.С., Піманов В.В. Інтенсифікація технологій виготовлення виробу «Балон 180×184». *Обработка материалов давлением: сборник научных трудов*. Краматорск: ДГМА, 2012. № 2 (31). – С. 136–140.
5. Шляпугин А.Г., Гречников Ф.В., Попов И.П., Хардин М. В. Разработка моделей формообразования листовых деталей летательных аппаратов с помощью современных программных средств: учеб. пособие. Самара: Изд-во Самар, гос. аэрокосм, ун-та, 2010. – С. 66.
6. Savelov D., Dragobetsky V., Puzyr R., Markevych A. Peculiarities of vibrational press dynamics with hard-elastic restraints in the working regime of metal powders molding. *Metallurgical and Mining Industry*. 2015, No. 2, pp. 67–75.
7. Савченко Н. Ф., Андилахай А.А. Совершенствование ремонтных работ крупногабаритных конструкций с использованием метода локальной штамповки. *Захист металургійних машин від поломок: зб. наукових праць*. Маріуполь: ПДТУ, 2014. Вип.16. – С. 104-108.
8. Савченко Н. Ф., Рубан Е.Н. Изготовление крупногабаритных деталей, емкостей и резервуаров. *Современное состояние использования импульсных источников энергии в промышленности: тез. докл.* Харьков: ХАИ, 2007. – С. 103–104.
9. Пилипенко О. В. Обжим и раздача трубных заготовок из анизотропных материалов. *Кузнечно-штамповочное производство*, 2007. № 11. – С. 18–23.
10. Третьякова Е. И. Сосенушкин Е. Н. Яновская Е. А. Определение полей напряжений при пластическом деформировании элементов оболочек. *Обработка материалов давлением: сборник научных трудов*. Краматорск: ДГМА, 2010. № 1 (22). – С. 49–54.

11. Третьяков А. В., Трофимов Г. К., Гурьянова М. К. Механические свойства сталей и сплавов при пластическом деформировании. Москва : Машиностроение, 1971. – С. 63.
12. Мовшович И. Я., Пузырь Р.Г. Расчет меридиональных напряжений на первой операции процесса радиально-ротационного профилирования ободьев колес. *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*, 2013. № 10. – С. 3–7.
13. Puzyr R., Kukhar V., Maslov A., Shchipkovskiy Y. The Development of the Method for the Calculation of the Shaping Force in the Production of Vehicle Wheel Rims. *International Journal of Engineering & Technology*. 2018, Vol. 7, No. 4.3, pp. 30–34.
14. Пузырь Р.Г. Моделирование вытягивания цилиндричной детали без притиску фланца заготовки з ізотропного та анізотропного металу. *Вісник Національного технічного університету*. Харків: ХПІ, 2019. № 1. – С. 58–66.
15. Аверкиев Ю.А., Аверкиев А.Ю. Технология холодной штамповки. М: Машиностроение, 1989. – С. 304.
16. Пузырь Р. Г., Троцко О.В., Черкашенко В.Ю. Влияние геометрических параметров цилиндрической заготовки на напряженно-деформированное состояние при раздате коническими пуансонами. // *Обработка материалов давлением: сборник научных трудов*. Краматорск: ДГМА, 2012. № 4 (33). – С. 114–121.
17. Шофман Л.А. Теория и расчеты процессов холодной штамповки. М: Машиностроение, 1964. – С. 375.
18. Драгобецкий В. В., Левченко Р. В., Пузырь Р. Г. Анализ напряжения заготовки при радиально-ротационном способе получения ободьев колес с измененной схемой внешнего воздействия. *Обработка материалов давлением*. Краматорск: ДГМА, 2012. № 1 (30). – С. 146–149.
19. Аргат Р. Г., Пузырь Р. Г., Долгих О. Н. Оценка приемов, увеличивающих степень деформации при вытяжке цилиндрических деталей без складкодержателя. *Вісник Нац. ун-ту "ХПІ": зб. наук. пр. Сер.: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії*. Харків: НТУ «ХПІ», 2017. № 36 (1258). – С. 5–9.
20. Аргат Р. Г., Пузырь Р. Г. Определение геометрических параметров листовой заготовки для вытяжки осесимметричных деталей, устраняющих потерю устойчивости фланца. *Обработка материалов давлением: сборник научных трудов*. Краматорск: ДГМА, 2013. № 2 (35). – С. 118–123.
21. Пузырь Р.Г. Определение поверхностной нагрузки, вызывающей пластическую деформацию цилиндрической заготовки. *Обработка материалов давлением: сборник научных трудов*. Краматорск: ДГМА, 2013. № 2 (35). – С. 99–105.
22. Аргат Р. Г., Пузырь Р. Г., Вакуленко Р. А. Вплив анізотропії і зміцнення металу на втрату стійкості фланца при витягуванні циліндричної деталі без складкоутримувача. *Вісник Нац. техн. ун-ту "ХПІ": зб. наук. пр. Сер.: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії*. Харків: НТУ «ХПІ», 2018. № 31 (1307). – С. 3–7.
23. Arhat R., Puzyr R., Haikova T. & Markevych A. Theoretical investigations of the stressed state on the exchange rate of matrix at highly cylinder parts. *Physical & chemical geotechnologies*. Дніпро: НТУ «ДП», 2018, pp. 137–139.
24. Аргат Р. Г., Пузырь Р. Г., Долгих О. Н., Гриценко Б. С. Учет влияния уппрочнения на поле напряжений при профилировании и вытяжке листового металла. *Вісник Нац. техн. ун-ту "ХПІ": зб. наук. пр. Сер.: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії*. Харків: НТУ «ХПІ», 2017. № 7 (1229). – С. 5–9.
25. Пузырь Р.Г., Дикая Л.Э. Определение зоны возможной потери устойчивости при раздате цилиндрической заготовки коническим пуансоном с учетом уппрочнения металла в процессе деформирования. *Матеріали Всеукраїнської науково – практичної конференції "Сучасні технології промислового комплексу", виступ 2*. Херсон: ХНТУ (факультет машинобудування), 2015. – С. 77–79.
26. Сосенушкин, Е.Н., Смолович И.Е., Яновская Е.А. Исследование процесса неравномерной раздачи трубных заготовок. *Збірник наукових праць / Вісник НТУ «ХПІ»: Нові рішення в сучасних технологіях*. Харків: НТУ «ХПІ», 2012. №47.

## References (transliterated)

1. Buzhilov A.L. Razrabotka al'ternativnoj tekhnologii proizvodstva naruzhnogo elementa kapsuly dlya zagotovok pustotelnyh turbokompressornyh valov iz granul. *Tekhnologiya legkih spлавov*, 2009. No2. – P. 57-62.
2. Puzyr, R., T. Haikova, J. Majernik, M. Karkova, J. Kmec. Experimental Study of the Process of Radial Rotation Profiling of Wheel Rims Resulting in Formation and Technological Flattening of the Corrugations. *Manufacturing Technology*, 2018. No 18 (1), pp. 106–111.
3. Mos'pan D. V., Dragobeckij V. V., Puzyr R. G. Opredelenie potrebnogo krutyashchego momenta pri radial'no-rotacionnom profilirovanii obod'ev koles. *Visnik Kremenchuc'kogo derzhavnogo politekhnichnogo universitetu imeni Mihajla Ostrogradskogo*. Kremenchuk: KDPU, 2008. Vip. 6 (53), chastina 2. – P. 64–66.
4. Maslov A., Batsaikhan J., Puzyr R., Salenko Y. The determination of the parameters of a vibration machine for the internal compaction of concrete mixtures. *International Journal of Engineering & Technology*. 2018, Vol. 7, No. 4.3, pp. 12–19.
5. Kalyuzhnyj, V. L., Zaporozhchenko A.S., Pimanov V.V. Intensifikaciya tekhnologij v igotovlennya listovyh «Balon 180x184». *Obrabotka materialov davleniem: sbornik nauchnyh trudov*. Kramatorsk: DGMA, 2012. No 2 (31). – P. 136–140.
6. Shlyapugin A.G., Grechnikov F.V., Popov I.P., Hardin M. V. Razrabotka modelej formoobrazovaniya listovyh detalej letatel'nyh apparatov s pomoshch'yu sovremennyh programmyh sredstv: ucheb. posobie. Samara: Izd-vo Samar, gos. aerokosm, un-ta, 2010. – P. 66.
7. Savelov D., Dragobetsky V., Puzyr R., Markevych A. Peculiarities of vibrational press dynamics with hard-elastic restraints in the working regime of metal powders molding. *Metallurgical and Mining Industry*. 2015, No. 2, pp. 67–75.
8. Savchenko N. F., Andilajaj A.A. Sovershenstvovanie remontnyh rbot krupnogabaritnyh konstrukcij s ispol'zovaniem metoda lokal'noj shtampovki. *Zahist metalurgijnyh mashin vid polomok: zb. naukovih prac'*. Mariupol': PDTU, 2014. Vip.16. – P. 104-108.
9. Savchenko N. F., Ruban E.N. Izgotovlenie krupnogabaritnyh detalej, emkoste i rezervuarov. *Sovremennoe sostoyanie ispol'zovaniya impul'snyh istochnikov energii v promyshlennosti: tez. dokl. Har'kov: HAI, 2007. – P. 103–104.*
10. Pilipenko O. V. Obzhim i razdacha trubnyh zagotovok iz anizotropnyh materialov. *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo*, 2007. No 11. – P. 18–23.
11. Tret'yakova E. I. Sosenushkin E. N. Yanovskaya E. A. Opredelenie polej napryazhenii pri plasticheskom deformirovanii elementov obolochek. *Obrabotka materialov davleniem: sbornik nauchnyh trudov*. Kramatorsk: DGMA, 2010. No 1 (22). – P. 49–54.
12. Tret'yakov A. V., Trofimov G. K., Gur'yanova M. K. Mekhanicheskie svoystva stalej i spлавov pri plasticheskom deformirovanii. Moskva : Mashinostroenie, 1971. – P. 63.
13. Movshovich I. YA., Puzyr R. G. Raschet meridional'nyh napryazhenij na pervoj operacii processa radial'no-rotacionnogo profilirovaniya obod'ev koles. *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo*. *Obrabotka materialov davleniem*, 2013. No 10. – P. 3–7.
14. Puzyr R., Kukhar V., Maslov A., Shchipkovskiy Y. The Development of the Method for the Calculation of the Shaping Force in the Production of Vehicle Wheel Rims. *International Journal of Engineering & Technology*. 2018, Vol. 7, No. 4.3, pp. 30–34.
15. Puzyr R.G. Modelyuvannya vityaguvannya cilindrichnoi detali bez pritisku flancya zagotovki z izotropnogo ta anizotropnogo metalu. *Visnik Nacional'nogo tekhnichnogo universitetu*. Har'kiv: HPI, 2019. No 1. – P. 58–66.
16. Averkiev YU.A., Averkiev A.YU. Tekhnologiya holodnoj shtampovki. M: Mashinostroenie, 1989. S. 304.
17. Puzyr R. G., Trocko O.V., Cherkashchenko V.YU. Vliyanie geometricheskikh parametrov cilindricheskoj zagotovki na napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie pri razdache konicheskimi puansonami. *Obrabotka materialov davleniem: sbornik nauchnyh trudov*. Kramatorsk: DGMA, 2012. No 4 (33). S. 114-121.
18. Shofman L.A. Teoriya i raschety processov holodnoj shtampovki. Moscow : Mashinostroenie, 1964. – P. 375.
19. Dragobeckij V. V., Levchenko R. V., Puzyr R. G. Analiz napryazheniya zagotovki pri radial'no-rotacionnom sposobe polucheniya obod'ev koles s izmenennoj skhemoj vneshnego vozdeystviya. *Obrabotka materialov davleniem*. Kramatorsk: DGMA, 2012. No 1 (30). – P. 146-149.

20. Argat R. G., Puzyr R. G., Dolgih O. N. Ocenka priemov, uvelichivayushchih stepen' deformacii pri vytyazhke cilindricheskikh detalej bez skladkoderzhatelya. Visnik Nac. tekhn. un-tu "HPI": zb. nauk. pr. Ser.: Innovacijni tekhnologii ta obladnannya obrobki materialiv u mashinobuduvanni ta metalurgii. Harkiv: NTU "HPI", 2017. No 36 (1258). – P. 5–9.
21. Argat R. G., Puzyr R. G. Opredelenie geometricheskikh parametrov listovoj zagotovki dlya vytyazhki osesimmetrichnykh detalej, ustranyayushchih poteryu ustojchivosti flanca. Obrabotka materialov davleniem: sbornik nauchnykh trudov. Kramatorsk: DGMA, 2013. No 2 (35). – P. 118–123.
22. Puzyr R.G. Opredelenie poverhnostnoj nagruzki, vyzyvayushchej plasticheskuyu deformaciyu cilindricheskoy zagotovki. Obrabotka materialov davleniem: sbornik nauchnykh trudov. Kramatorsk: DGMA, 2013. No 2 (35). – P. 99–105.
23. Argat R. G., Puzyr R. G., Vakulenko R. A. Vpliv anizotropii i zmicnennya metalu na vtratu stijkosti flancya pri vityaguvanni cilindrichnoi detali bez skladkoutrimuvacha. Visnik Nac. tekhn. un-tu "HPI": zb. nauk. pr. Ser.: Innovacijni tekhnologii ta obladnannya obrobki materialiv u mashinobuduvanni ta metalurgii. Harkiv: NTU «HPI», 2018. No 31 (1307). – P. 3–7..
24. Arhat R., Puzyr R., Haikova T. & Markevych A. Theoretical investigations of the stressed state on the exchange rate of matrix at highly cylinder parts. *Physical & chemical geotechnologies*. Dnipro: NTU «DP», 2018, pp. 137–139.
25. Argat R. G., Puzyr R. G., Dolgih O. N., Gricenko B. S. Uchet vliyaniya uprochneniya na pole napryazhenij pri profilirovanii i vytyazhke listovogo metalla. Visnik Nac. tekhn. un-tu "HPI": zb. nauk. pr. Ser.: Innovacijni tekhnologii ta obladnannya obrobki materialiv u mashinobuduvanni ta metalurgii. Harkiv: NTU "HPI", 2017. No 7 (1229). – P. 5–9.
26. Puzyr R.G., Dikaya L.E. Opredelenie zony vozmozhnoj poteri ustojchivosti pri razdache cilindricheskoy zagotovki konicheskim puansonom s uchedom uprochneniya metalla v processe deformirovaniya. Materiali Vseukrains'koї naukovo – praktichnoi konferencii "Suchasni tekhnologii promislavogo kompleksu", випуск 2. Herson: HNTU (fakul'tet mashinobuduvannya), 2015. – P. 77–79.
27. Sosnushkin, E.N., Smolovich I.E., Yanovskaya E.A. Issledovanie processa neravnomernoj razdachi trubnykh zagotovok. Zbirnik naukovih prac' // Visnik NTU "HPI" : Novi rishennya v suchasni tekhnologiyah. Harkiv: NTU «HPI», 2012. No47.

Надійшла (received) 02.11.2019

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

**Пузырь Руслан Григорьевич (Puzyr Ruslan Grigoriyevich, Puzyr Ruslan)** – доктор технических наук, доцент, Колледж Кременчугского национального университета имени Михаила Остроградского, доцент отделения машиностроения; г. Кременчуг, Украина; ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9791-9002>; e-mail: [puzyruslan@gmail.com](mailto:puzyruslan@gmail.com).

**Левченко Роман Владимирович (Levchenko Roman Volodimirovich, Levchenko Roman)** – кандидат технических наук, Колледж Кременчугского национального университета имени Михаила Остроградского, г.Кременчуг, Украина; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2033-2905>; e-mail: [lr78@i.ua](mailto:lr78@i.ua)

**Сирая Юлия Борисовна (Sira Yuliya Borisivna, Siraya Yulia)** – аспирант, Колледж Кременчугского национального университета имени Михаила Остроградского, преподаватель; г.Кременчуг, Украина; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9247-4777>; e-mail: [julia\\_sobol@i.ua](mailto:julia_sobol@i.ua)

**Лелюх Сергей Николаевич (Lelukh Serhiy Mikolayovych, Lelukh Serhiy)** – аспирант, Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского, г. Кременчуг, Украина.

УДК 621.7

*С. Ф. САБОЛ, В. М. ГОРНОСТАЙ, П. О. ЛЕВЧЕНКО***ФОРМУВАННЯ ФЛАНЦІВ В ТУБЧАСТИХ ЗАГОТОВКАХ В ШТАМПАХ  
З АКТИВНОЮ ДІЄЮ СИЛ ТЕРТЯ**

Запропоновано ефективну схему процесу холодного об'ємного формування фланців в трубчастих заготовках, що забезпечує зменшення енергосилових параметрів процесу завдяки використанню активних сил тертя.

Методом скінченних елементів, за допомогою програмного середовища «DEFORM», встановлено, що зусилля деформування на пуансоні зменшується під впливом активних сил тертя, які викликані рухом оправки на якій установлена трубчаста заготовка. Таким чином, зусилля зменшуються при збільшенні швидкості оправки. Оптимальна швидкість оправки вдвічі більша, ніж швидкість течії zdeформованого металу. Зі зменшенням товщини стінки виробу, зменшується зусилля процесу. За розробленою схемою видавлювання без руху оправки зусилля сягало 215тс. Схема з рухомою оправкою, де швидкість дорівнювала швидкості течії zdeформованого металу зусилля сягало 190тс, що свідчить про те що, за рахунок активних сил тертя спостерігається зниження зусилля на 11.6%.

Також було проведено моделювання де швидкість оправки у 2 рази більше швидкості течії zdeформованого металу, зусилля падало на 13.4%. Проаналізувавши характер розподілу напружень  $\sigma_p$   $\sigma_z$   $\sigma_\theta$ , визначено що максимальні значення напруження досягають в зоні під пуансоном та зменшуються за рахунок збільшення руху оправки. Показник інтенсивності деформації  $\epsilon_i$ , вказує на те що найбільш інтенсивно деформація протікає в об'ємі який контактує з пуансоном та збільшується зі швидкістю оправки.

Використання ступеню ресурсу пластичності  $\psi$ , у випадку коли оправка не рухома сягає 0,078 та збільшується під час руху оправки до 0,156. А також при збільшенні руху оправки у двічі, показник досягає відмітки 0.155. Данні результати вказують на те, що формоутворення буде проходити без руйнування.

**Ключові слова:** холодне об'ємне штампування, фланці, трубчасті заготовки, активні сили тертя, рухома оправка, метод скінченних елементів, енергосилові параметри, напружено – деформований стан, ступінь використання ресурсу пластичності.

*С. Ф. САБОЛ, В. Н. ГОРНОСТАЙ, П. А. ЛЕВЧЕНКО***ФОРМИРОВАНИЕ ФЛАНЦЕВ В ТУБЧАСТИХ ЗАГОТОВКИ В ШТАМПЕ  
С АКТИВНЫМ ДЕЙСТВИЕМ СИЛ ТРЕНИЯ**

Предложено эффективную схему процесса холодной объемной штамповки фланцев в трубчатых заготовках, что обеспечивает уменьшение энергосиловых параметров процесса благодаря использованию активных сил трения

Методом конечных элементов, с помощью программной среды «DEFORM», установлено, что усилия деформирования на пуансоне уменьшаются под влиянием активных сил трения, вызванные увеличением скорости оправки. Таким образом, усилия уменьшаются при увеличении скорости оправки. Оптимальная скорость оправки вдвое больше, чем скорость течения деформированного металла. С уменьшением толщины стенки изделия, уменьшается усилия процессу. За разработанной схеме обратного выдавливания без движения оправки усилия вили 215тс. Схема с подвижной оправкой, где ее скорость равна скорости течения деформированного металла усилия становилили 190тс, что свидетельствует о том, что за счет активных сил трения наблюдается снижение усилия на 11.6%.

Также было проведено моделирование процесса, когда скорость оправки в 2 раза больше скорости течения деформированного металла, усилия падало на 13.4%. Проанализировав характер распределения напряжений  $\sigma_p$   $\sigma_z$   $\sigma_\theta$ , определено, что максимальные значения напряжения достигают в зоне под пуансоном и уменьшается за счет увеличения движения оправки. Показатель интенсивности деформации  $\epsilon_i$ , указывает на то, что наиболее интенсивно деформация протекает в объеме, который контактирует с пуансоном, и увеличивается со скоростью оправки.

Использование степени ресурса пластичности  $\psi$ , в случае, когда оправка неподвижной достигает 0,078 и увеличивается при движении оправки к 0,156. А также при увеличении движения оправки в два раза, показатель достигает отметки 0.155. Данные результаты указывают на то, что формообразования будет проходить без разрушения.

**Ключевые слова:** холодное объемная штамповка, фланцы, трубчатые заготовки, активные силы трения, подвижная оправка, метод конечных элементов, энергосиловые параметры, напряженно – деформированное состояние, степень использования ресурса пластичности.

*S. F. SABOL, V. M. GORNOSTAY, P. O. LEVCHENKO***FORMATION OF FLANGES IN TUBE BLADES IN PRINTS  
WITH THE ACTIVE ACTION OF Friction**

An effective scheme of the process of cold forming of flanges in tubular billets is proposed, which ensures a reduction in the energy-power parameters of the process due to using active forces of friction

Using the method of finite element, using DEFORM software environment, it was established that the deformation forces on the punch are reduced under the influence of active friction forces caused by an increase in the mandrel speed. Thus, the forces decrease with increasing mandrel speed. The optimal mandrel speed is twice as much as the flow rate of a deformed metal. With a wall thickness decreasing in the product, the power of process decreases. Due to the developed scheme of reverse extrusion without movement of the mandrel, the force is 215 tf. A scheme with a movable mandrel, where its speed is equal to the speed of the flow of the deformed metal, the forces has risen to 190 tf, which indicates that due to the active friction forces, the force is reduced for 11.6%.

The process was also simulated when the speed of the mandrel was 2 times higher than the flow rate of the deformed metal, the force dropped in 13.4%. After analyzing the nature of the stress distribution  $\sigma_p$   $\sigma_z$   $\sigma_\theta$ , it is determined that the maximum stress values reach in the zone under the punch and decreases due to an increase in the movement of the mandrel. The strain intensity index  $\epsilon_i$  indicates that the most intense strain occurs in the volume that is in contact with the punch, and increases with the speed of the mandrel.

Using the degree of plasticity resource  $\psi$ , in the case when the mandrel is motionless reaches 0.078 and increases when the mandrel moves to 0.156. And also when the movement of the mandrel is doubled, the indicator reaches 0.155. These results indicate that the shaping is going to without destruction.

**Key words:** cold stamping, flanges, tubular billets, active friction forces, movable mandrel, finite element method, energy and energy parameters, stress-strain state, degree of use of the plasticity resource.

© С. Ф. Сабол, В. М. Горностай, П. О. Левченко, 2019



**Вступ** Отримання фланців в трубчастих заготовках за допомогою операцій холодного об'ємного штампування – один із самих ефективних способів виготовлення деталей перехідників для трубопроводів та трубопровідної арматури, який забезпечує високу якість і точність деталей, а також характеризується високою продуктивністю.

Але, не завжди можливе застосування вказаного процесу для отримання потрібної деталі, через те, що можливості холодної формозміни трубчастих заготовок, завдяки значним зусиллям деформування, обмежені втратою стійкості та підвищенням зношення деформуючого інструменту. Це призводить до того, що собівартість отриманих виробів збільшується.

Одним із методів підвищення ефективності процесу холодного об'ємного деформування є зміна механічної схеми напруженого стану в осередку пластичної деформації з традиційної – схеми всебічного нерівномірного стиснення на стиснуто – розтягувальну, що суттєво впливає на енергосилові параметри процесу формозміни матеріалу заготовок. В пропонуваній роботі вказана вище зміна схеми напруженого стану забезпечується використанням активних сил тертя.

**Мета роботи:** підвищення ефективності процесу холодного об'ємного формування фланців в трубчастих заготовках шляхом зменшення енергосилових параметрів процесу, що забезпечується використанням активних сил тертя.

Дану задачу можна вирішити за допомогою застосування штампів спеціальної конструкції, в яких активні сили тертя забезпечуються рухомою оправкою, яка переміщується зі швидкістю більшою, ніж швидкість течії здеформованого металу.

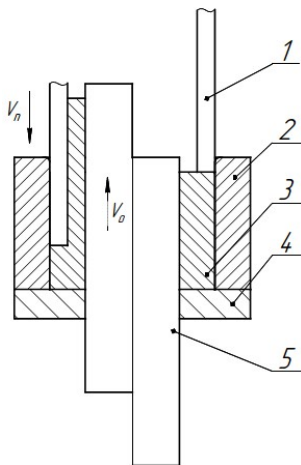


Рис.1 – Схема процесу холодного формування фланців в трубчастій заготовці з застосуванням активних сил тертя (1 – пунсон, 2 – контейнер, 3 – заготовка, 4 – нижня плита, 5 – оправка)

Дослідження направлені на визначення оптимальної швидкості рухомої оправки при якій енергосилові параметри процесу холодної формозміни мінімальні, а також визначаються геометричні характеристики штампів, які забезпечують вказану швидкість.

Схема процесу холодного формування фланців в трубчастій заготовці з застосуванням активних сил тертя приведена на рис. 1.

Проводився порівняльний аналіз формування фланців в трубчастих заготовках традиційного процесу та процесу з використанням активних сил тертя при різних значеннях швидкості переміщення оправки.

Моделювання проводили для трубчастих заготовок із такими розмірами: діаметр –  $D_0 = 56$  мм, товщина стінки –  $S_0 = 12$  мм, висота заготовки –  $H_0 = 40$  мм.

Фізико-механічні параметри матеріалу, що деформується: сталь 10,  $\sigma_T = 200$  МПа Швидкість деформуючому інструменту задавали постійною, – вона становила 0,5 мм/с.

Вплив параметрів на процес холодної формозміни досліджували шляхом введення таких параметрів, як: коефіцієнт тертя на контактуючих поверхнях задавали  $\mu = 0,12$ , та змінною швидкістю оправки: для випадків оправка нерухома; швидкість оправки дорівнює швидкості течії здеформованого металу; швидкість оправки дорівнювала двом швидкостям здеформованого металу

В результаті проведення чисельних експериментів були отримані наступні графіки зусилля процесу в залежності від швидкості переміщення оправки.

При нерухомій оправці максимальне зусилля сягає 215тс. В випадку руху оправки зі швидкістю течії металу, максимальне зусилля сягає 190тс. Що свідчить про те, що активні сили тертя при руху оправки зменшують питоме зусилля на 11.6%. При швидкості оправки, яка вдвічі більша, ніж швидкість течії металу максимальне зусилля сягає 186тс. Подальше збільшення швидкості оправки зумовлює збільшення зусилля процесу.



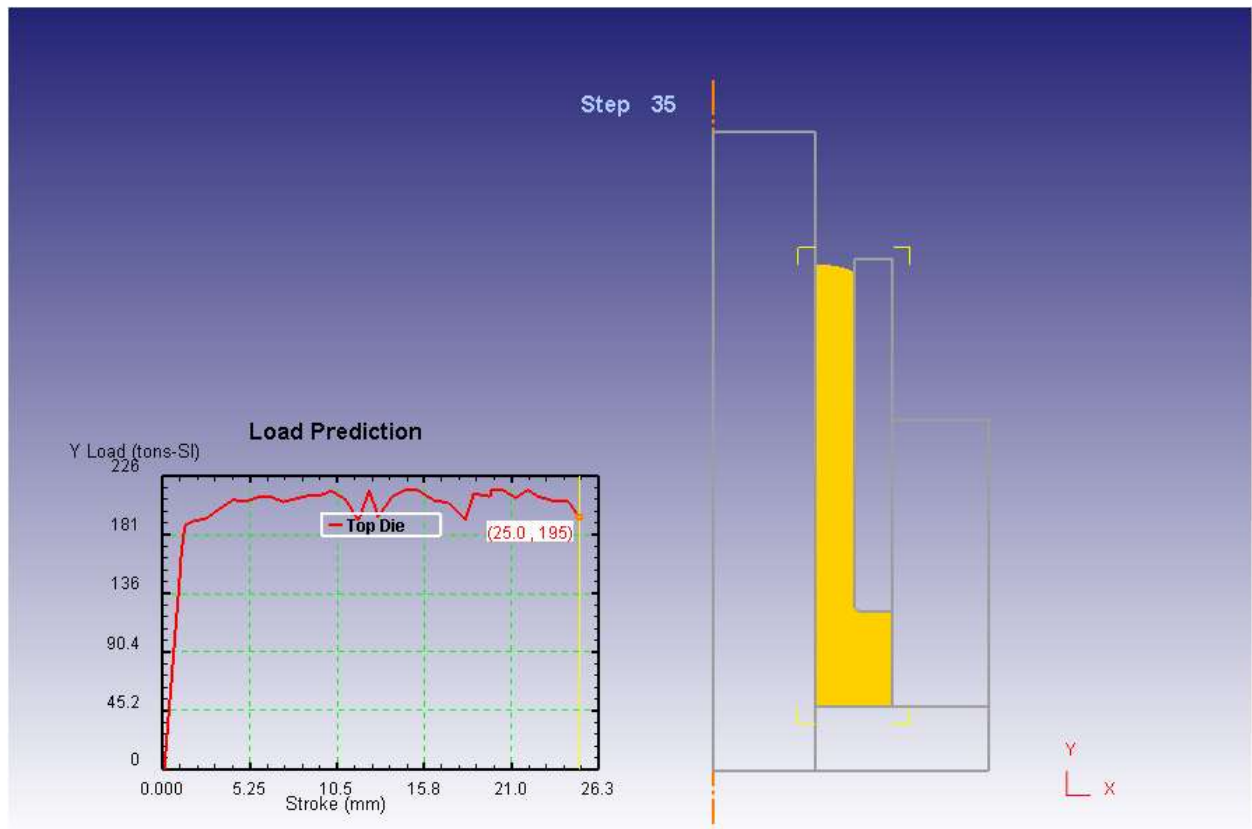


Рис. 2 – Залежність зусилля обтиску від переміщення пуансону при нерухомій оправці

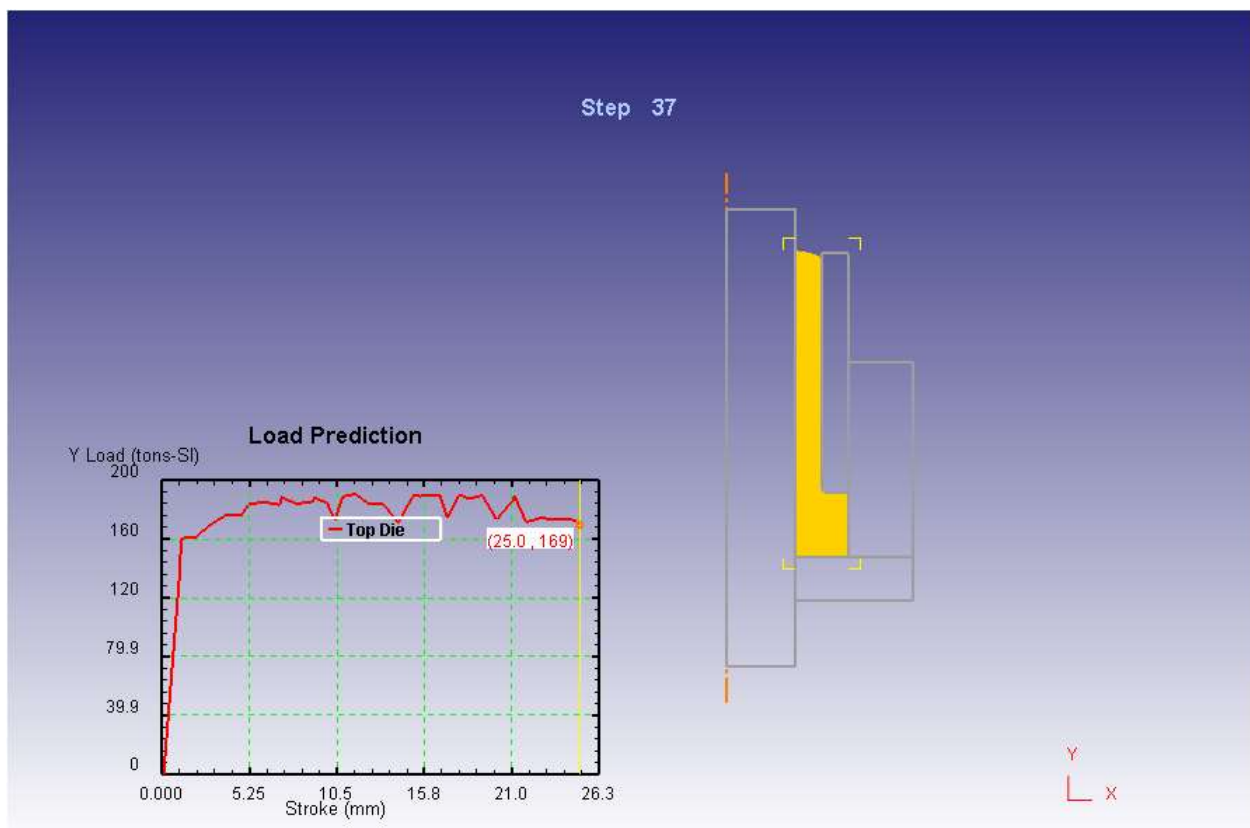


Рис. 3 – Залежність зусилля видавлювання від переміщення пуансону при швидкості руху оправки рівній швидкості течії металу

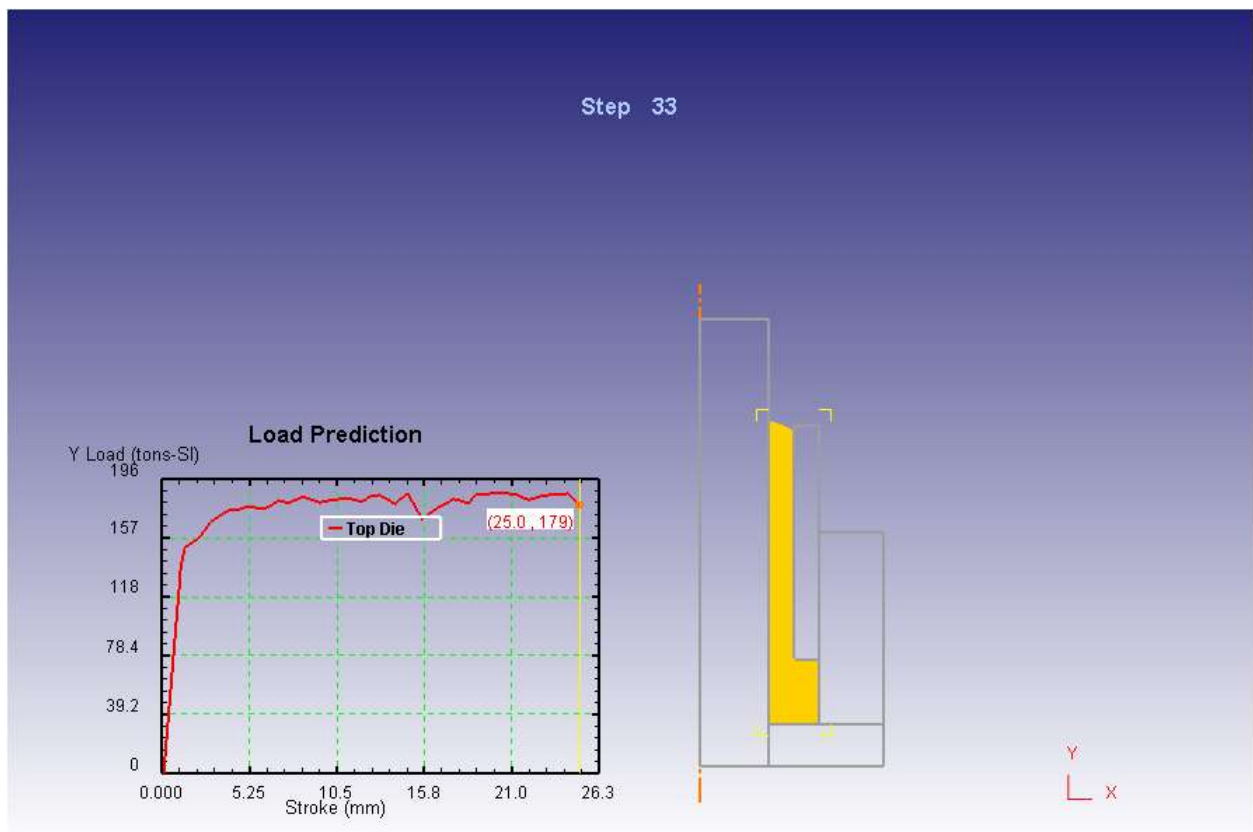


Рис. 4 – Залежність зусилля видавлювання від переміщення пуансона при швидкості руху оправки вдвічі більшій швидкості течії металу

В результаті проведення чисельних експериментів було встановлено характер розподілу інтенсивності напружень  $\sigma_i$ , інтенсивності деформації  $\varepsilon_i$ , а також ступеню використання ресурсу

пластичності  $\Psi$  по об'єму циліндричної деталі, що піддається деформуванню при різних швидкостях переміщення оправки

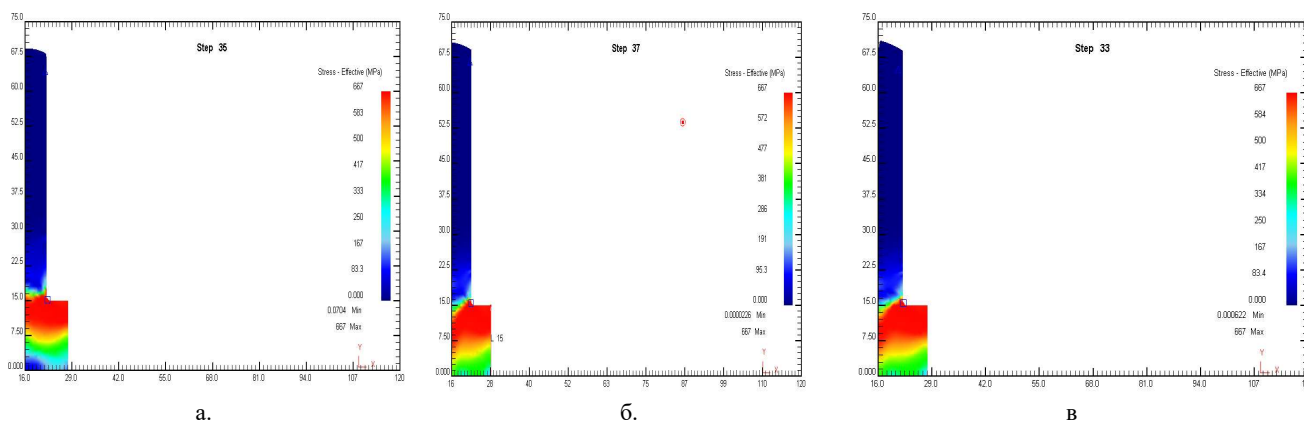
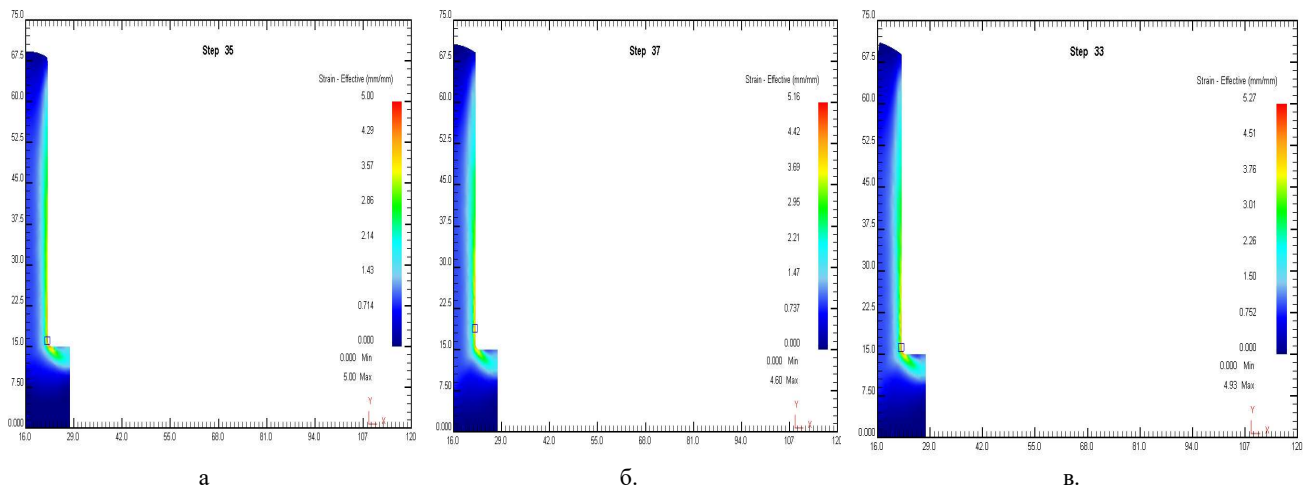
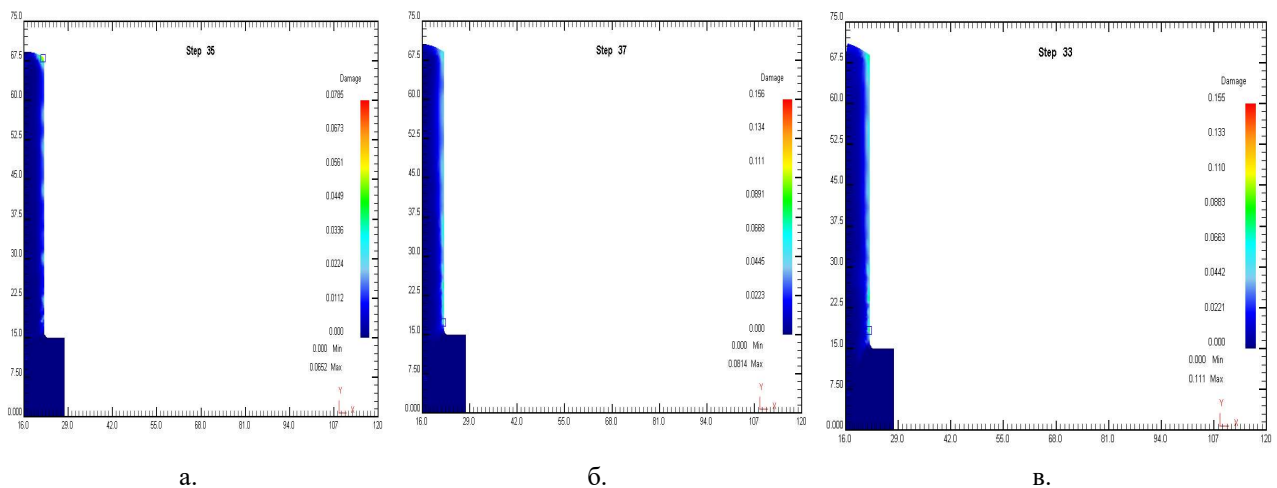


Рис.5 – Розподіл інтенсивності напружень  $\sigma_i$   
 а – оправка нерухома; б – швидкість оправки дорівнює швидкості течії деформованого металу;  
 в – швидкість оправки дорівнювала двом швидкостям деформованого металу

Рис. 6 – Розподіл інтенсивності деформації  $\epsilon_i$ 

а – оправка нерухома; б – швидкість оправки дорівнює швидкості течії здеформованого металу;  
 в. – швидкість оправки дорівнювала двом швидкостям здеформованого металу

Рис.7 – Розподіл ступеню використання ресурсу пластичності  $\Psi_i$ 

а.– оправка нерухома; б.– швидкість оправки дорівнює швидкості течії здеформованого металу; в.– швидкість оправки дорівнювала двом швидкостям здеформованого металу

**Висновки:** 1. Запропоновано ефективну схему процесу холодного об'ємного формування фланців в трубчастих заготовках шляхом зменшення енергосилових параметрів процесу, що забезпечується використанням активних сил тертя.

Методом скінченних елементів, за допомогою програмного середовища «DEFORM», встановлено що зусилля деформування на пуансоні зменшується під впливом активних сил тертя, які викликані збільшенням швидкості оправки. Таким чином, зусилля зменшуються при збільшенні швидкості оправки. Оптимальна швидкість оправки вдвічі більша, ніж швидкість течії здеформованого металу. Зі зменшенням товщини стінки виробу, зменшується зусилля процесу.

За розробленою схемою зворотного видавлювання без руху оправки зусилля сягало 215тс. Схема з рухомою оправкою, де швидкість дорівнювала швидкості течії здеформованого металу зусилля сягало 190тс, що свідчить про те що, за рахунок активних сил тертя спостерігається зниження зусилля на 11.6%. Також було проведено модулювання де швидкість оправки у 2 рази більше швидкості течії здеформованого металу, зусилля падало на 13.4%.

2. Проаналізувавши характер розподілу напружень  $\sigma_r$   $\sigma_z$   $\sigma_\theta$ , визначено що максимальні значення напруження досягають в зоні під пуансоном та зменшується за рахунок збільшення руху оправки.

3. Показник інтенсивності деформації  $\epsilon_i$ , вказує на те що найбільш інтенсивно деформація протікає в

об'ємі який контактує з пуансоном та збільшується зі швидкістю оправки.

4. Використання ступеню ресурсу пластичності  $\psi$ , у випадку коли оправка не рухома сягає 0,078 та збільшується під час руху оправки до 0,156. А також при збільшенні руху оправки у двічі, показник досягає відмітки 0.155. Данні результати вказують на те, що формоутворення буде проходити без руйнування.

#### Список літератури

1. Ковка и объемная штамповка: Справочник. В 4-хт. / Ред. совет: Е.И. Семенов (пред.) и др.. – Т. 3. Холодная объемная штамповка / Под ред. Г.А. Навроцкого. – М.: Машиностроение, 1987. – 384с.
2. Евстратов В.А. Теория обработки металлов давлением. Учебник для студентов вузов, обучающихся по спец. "Машины и технология обработки металлов давлением". – Харьков: Вища школа. Изд-во при Харьк. ун-те, 1981. – 248 с.
3. З.Сторожев М.В., Попов Е.А. Теория обработки металлов давлением. Учебник для вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1977. – 423с
4. Теория пластических деформаций металлов/ Е.П. Унксов, У. Джонсон, В.Л. Колмогоров и др.; под ред. Е.П. Унксова, А.Г. Овчинникова. – М.: Машиностроение, 1983 – 598 с

#### References (transliterated)

1. Kovka i ob'yemnaya shtampovka: Spravochnik. V 4-kht. / red. sovet: Ye.I. Semenov (pred.) i dr.. – T. 3. Kholodnaya ob'yemnaya shtampovka / pod red. G.A. Navrotskogo. – Moscow: Mashinostroyeniye, 1987. – 384 p.o
2. Yevstratov V.A. Teoriya obrabotki metallov davleniyem. Uchebnik dlya studentov vuzov, obuchayushchikhsya po spets. "Mashiny i tekhnologiya obrabotki metallov davleniyem". – Khar'kov: Vishcha shkola. Izd-vo pri Khar'k. un-te, 1981. – 248 p.
3. Z.Storozhev M.V., Popov Ye.A. Teoriya obrabotki metallov davleniyem. Uchebnik dlya vuzov. – 4-ye izd., pererab. i dop. – Moscow:: Mashinostroyeniye, 1977. – 423 p.
4. Teoriya plasticheskikh deformatsiy metallov/ Ye.P. Unksov, U. Dzhonson, V.L. Kolmogorov i dr.; pod red. Ye.P. Unksova, A.G. Ovchinnikova. – Moscow:: Mashinostroyeniye, 1983. – 598 p– P. 49–53.

Надійшла (received) 18.11.2019

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

**Сабол Сергій Францович (Сабол Сергей Францевич, Sabol Sergey Frantsovych)** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», доцент кафедри механіки пластичності матеріалів та ресурсозберігаючих процесів; тел.: (050) 719-30-26; e-mail: sabol1@ukr.net.

**Горностаї Вадим Миколайович (Горностаї Вадим Николаевич, Gornostaj Vadim Mikolajovich)** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», доцент кафедри механіки пластичності матеріалів та ресурсозберігаючих процесів; т. 050-53-58-653

**Левченко Павло Олександрович (Левченко Павел Александрович, Levchenko Pavel Oleksandrovych)** – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», магистр

УДК 620.179.16: 620.179.17

*САЛАМ БУССИ, Г. М. СУЧКОВ, Р. П. МИГУЩЕНКО, О. Ю. КРОПАЧЕК, С. Ю. ПЛЕСНЕЦОВ***СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ ПРОКАТА С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНО-АКУСТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ**

Выполнен анализ информационных источников по теоретическому и модельному исследованиям, разработкам способов и приборов для электромагнитно-акустического контроля металлоизделий, а также применению таких устройств для дефектоскопии, толщинометрии, диагностики и определения физико – механических характеристик материалов металлоизделий.

Установлено, что на сегодня не разработаны общие теоретические основы построения электромагнитно-акустических преобразователей различного назначения. Поэтому работы в этом направлении актуальны.

Показана перспективность использования импульсного намагничивания изделий, что позволяет увеличивать индукцию магнитного поля до 2...3 Тл. Однако необходимо решать вопрос подавления шумов Баркгаузена. Кроме того, при контроле ферромагнитных изделий типа труб, заготовок, рельсов, листов и др. необходимо решать вопрос сильного притяжения преобразователя к металлу, а при использовании постоянных магнитов – налипания отслоившейся окалины.

Экспериментально показана высокая эффективность применения устройств и установок для дефектоскопии, особенно при автоматическом контроле больших объемов катаных изделий.

**Ключевые слова:** металлоизделие, бесконтактный ультразвуковой контроль, дефект, чувствительность, электромагнитно-акустический, дефектоскопия, толщинометрия, диагностика.

*САЛАМ БУССИ, Г. М. СУЧКОВ, Р. П. МИГУЩЕНКО, О. Ю. КРОПАЧЕК, С. Ю. ПЛЕСНЕЦОВ***СУЧАСНИЙ СТАН МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЮ ПРОКАТА З ВИКОРИСТАННЯМ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ-АКУСТИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ**

Виконано аналіз інформаційних джерел з теоретичного і модельного досліджень, розробок способів і приладів для електромагнітно-акустичного контролю металовиробів, а також застосування таких пристроїв для дефектоскопії, товщинометрії, діагностики та визначення фізико - механічних характеристик матеріалів металовиробів.

Встановлено, що на сьогодні не розроблені загальні теоретичні основи побудови електромагнітно-акустичних перетворювачів різного призначення. Тому роботи в цьому напрямку є актуальними.

Показана перспективність використання імпульсного намагнічування виробів, що дозволяє збільшувати індукцію магнітного поля до 2...3 Тл. Однак необхідно вирішувати питання придушення шумів Баркгаузена. Крім того, при контролі феромагнітних виробів типу труб, заготовок, рейок, листів та ін. Необхідно вирішувати питання сильного тяжіння перетворювача до металу, а при використанні постійних магнітів - налипання відшарувалася окалини.

Експериментально показана висока ефективність застосування пристроїв і установок для дефектоскопії, особливо при автоматичному контролі великих обсягів катаных виробів.

**Ключові слова:** металовиріб, безконтактний ультразвуковий контроль, дефект, чутливість, електромагнітно-акустичний, дефектоскопія, товщинометрія, діагностика.

*SALAM BUSSI, G. M. SUCHKOV, R. P. MIGUSCHENKO, O. Yu. KROPACHEK, S. Yu. PLESNETSOV***CURRENT STATE OF METHODS AND MEANS OF ULTRASONIC CONTROL RENTAL WITH USE OF ELECTROMAGNETIC-ACOUSTIC CONVERTERS**

The analysis of information sources on theoretical and model research, the development of methods and devices for electromagnetic - acoustic control of metal products, as well as the use of such devices for flaw detection, thickness measurement, diagnostics and determination of physico - mechanical characteristics of metal products is carried out.

It is established that today the general theoretical foundations of constructing electromagnetic - acoustic transducers for various purposes have not been developed. Therefore, work in this direction is relevant.

The prospects of using pulsed magnetization of products is shown, which allows to increase the magnetic field induction to 2 ... 3 T. However, it is necessary to resolve the issue of Barkhausen noise reduction. In addition, when monitoring ferromagnetic products such as pipes, billets, rails, sheets, etc., it is necessary to solve the issue of strong attraction of the converter to the metal, and when using permanent magnets, the adhesion of exfoliated scale.

The high efficiency of the use of devices and installations for flaw detection has been experimentally shown, especially with automatic control of large volumes of rolled products.

**Key words:** metal products, non-contact ultrasonic testing, defect, sensitivity, electromagnetic-acoustic, flaw detection, thickness measurement, diagnostics.

**Введение.** В мире огромное количество изделий изготавливают путем прокатки: листы, трубы, заготовки, рельсы и др. Требования к качеству этой продукции возрастают и обеспечиваются неразрушающими методами контроля (НК), среди которых основным является ультразвуковой (УЗ). Большие объемы выпуска металлоизделий требуют выполнять УЗ контроль с высокой скоростью сканирования, в горячем и холодном состоянии, зачищать поверхность объектов контроля (ОК). В таких условиях традиционные контактные методы во

многих случаях не могут обеспечить качественный УЗ контроль (УЗК). Аналогичные проблемы имеют место при эксплуатации различных объектов и изделий, например, с лакокрасочными или пластиковыми покрытиями, которые необходимо удалять перед проведением УЗ дефектоскопии, а затем восстанавливать после контроля, что значительно удорожает технологию НК.

Решить отмеченные недостатки традиционного метода УЗ контроля возможно за счет применения бесконтактных методов возбуждения и приема

ультразвуковых импульсов, среди которых наиболее развитым считается электромагнитно – акустический (ЭМА) [1]. При этом авторы работы [2] при оценке состояния и тенденций развития акустических (ультразвуковых) методов, средств и технологий неразрушающего контроля и технической диагностики утверждают о значительном интересе мировых разработчиков к использованию ЭМА контроля. Существенная экономическая эффективность применения ЭМА контроля подтверждается в статьях [3–4], и данными о его промышленном применении, например, на сайте [5]. Это говорит об актуальности исследований и разработок по ЭМА контролю.

**Теоретические и экспериментальные исследования, разработки методов и средств эма контроля и диагностики.** Большинство специалистов традиционно считают, что главным недостатком ЭМА преобразователей, который сдерживает их использование в промышленности, является низкая чувствительность к несоответствиям ОК, выявление которых регламентируется нормативно-технической документацией. Согласно публикациям [6–9] существует значительное разночтение в оценке этого параметра при обнаружении внутренних дефектов эхо методом. Причем, в справочнике [1] указано, что чувствительность ультразвукового ЭМА метода при двойном преобразовании меньше, чем контактного на 4 порядка, а в работе [6], что на 3 порядка. Кроме того, в работе [1] утверждается, что коэффициент преобразования ЭМАП для излучения и приема по отдельности меньше, чем для пьезоэлектрического преобразователя (ПЭП) на 2 порядка. Алешин Н.П. и др. в работе [7] показали, что коэффициент двойного ЭМА преобразования отличается от такого же для ПЭП в 500...1000 раз, а коэффициенты для излучения и приема по отдельности отличаются между собой в 2 раза. При этом в [1, с. 74] отмечается, что ЭМА методом уверенно обнаруживаются модели дефектов незначительного размера. Следует отметить, что Кавашима К. еще в 1976 г. [8] приводил данные о том, что выявляемость плоскостного отражателя диаметром 1,3 мм ЭМАП и ПЭП практически одинаковы. АО «Votum» [9] серийно выпускает приборы ультразвукового контроля с ЭМА преобразователями (УД4-Т), но при этом отмечает их недостаточную чувствительность? При контроле поверхностными волнами в работе [10] доказана возможность выявления поверхностных дефектов глубиной 0,2...0,5 мм на расстояниях более 1 м, а в работе [11] даже глубиной 0,01 мм.

Приведенные противоречивые результаты о чувствительности (обнаруживаемости) ЭМА контроля говорят о высокой сложности теоретических работ и исследований, от которых зависят результаты разработки и использования ЭМА преобразователей. Так, Ермолов И.Н. в работе [12] рассмотрел «...достижения в теоретических вопросах ультразвуковой дефектоскопии примерно за 20 прошедших лет». Им показано, что в последнее время наметились тенденции использования новых или мало

применяемых типов ультразвуковых волн, которые раньше почти не использовались для диагностики объектов различного вида. В связи с этим возникают проблемы теоретического и практического характера. Значительное количество существенных проблем контроля может быть решено с применением ЭМА преобразователей. При этом Ермолов И.Н. указывает на недостаточность разработок специального оборудования для реализации ЭМА метода в промышленности: ЭМАП, генераторов мощных высокочастотных импульсов, малошумящих усилителей, быстродействующих систем обработки информации.

Сазонов Ю.И. [13] также указывает на то, что исследование макро– и микроскопических механизмов ЭМА преобразования различного вида является одной из наиболее важных и, в то же время, сложных проблем радиофизики, физической и прикладной акустики, физики твердого тела, физики магнитных явлений, теплофизики и молекулярной физики. Исследование ЭМА эффектов является нетипичной задачей электродинамики взаимодействующих тел и полей разного типа и структуры. Изучение ЭМА эффекта дает возможность лучше понять физические процессы генерации, распространения и приема ультразвуковых волн электромагнитными методами, что важно для построения общей теории и создания разного рода устройств и преобразователей, т.е. ставится задача построения общей теории ЭМА преобразования; создания научных основ конструирования ЭМАП и необходимого специального оборудования.

Многие исследователи из разных стран за последние 15 лет выполняли теоретические, модельные и практические исследования, направленные на разработку оборудования для ультразвукового контроля с применением ЭМАП [14–48].

Так, группой исследователей под руководством Мужижкого В.Ф. опубликовано более 50 теоретических статей, например, [14–18], направленных на исследование механизмов прямого, обратного и двойного ЭМА преобразования в приложении к толщинометрии и дефектоскопии в нормальном и тангенциальном поляризуемых полях в основном для накладных ЭМАП.

Группа ученых из Ижевска под руководством Муравьевой О.В., Муравьева В.В. опубликовала более 30 теоретических и модельных статей, по тематике, связанной с ЭМА контролем стержней, труб и аналогичных изделий, например, [19–23]. Выполнены ограниченные исследования локальных процессов преобразования, диаграмм направленности синфазных и противофазных ЭМА преобразователей при разных размерах и расположении элементов высокочастотных катушек и намагничивающей системы.

Авторы работ [24–29] на базе теории Власова К.Б., теоремы Шокли-Рамо и теоремы Дж. Маллинсона пошли по пути комплексного создания математических моделей, во время которых удалось вычленил в общем расчетном выражении часть,



которая позволяет производить расчеты конструкций ЭМАП для возбуждения и приема поверхностных и крутильных колебаний. При исследованиях применен метод интегральных преобразований, который, с учетом современных вычислительных возможностях, целесообразно использовать при дальнейших исследованиях.

Значительная часть исследователей направили усилия на создание средств ЭМА контроля за счет широкого применения моделирования и теоретических исследований [25–31]. Так, Чабанов В.Е. и Жуков В.А. рассмотрели проблемы, связанные с конструированием ЭМАП [31] и утверждают, что для эффективной разработки ЭМАП необходимо учитывать не менее 35 параметров. Ими получена чрезвычайно громоздкая математическая модель, учитывающая 38 параметров, но методологии, каким образом с ее помощью рассчитать конструкцию ЭМАП с заданными характеристиками не приведено.

В известных источниках, опубликованных за рубежом [32–48] просматривается аналогичная вышеописанной структура работ и результатов по вопросу ЭМА контроля: теоретические исследования; разработки и моделирование; практическое применение. Следует отметить, что в теоретическом плане зарубежные исследования принципиально не отличаются от вышеупомянутых полученных результатов, например, [13, 32]. Они в большей степени посвящены моделированию [33–36] направленному совершенствованию ЭМАП и разработке ЭМА преобразователей для конкретных практических применений [37–41]. Применение преобразователей в промышленности для контроля неординарных изделий и материалов [42–44] в том числе с использованием нелинейных эффектов [45]. Продолжаются исследования, направленные на совершенствование конструкций приборов [46–47], а также применение методов обработки информации [48].

Из экспериментальных результатов можно отметить перспективные разработки ЭМАП с импульсным намагничиваем [49–51]. Величину индукции магнитного поля удается увеличивать до 2...3 Тл, однако не решен вопрос исключения шумов Баркгаузена, помех в металлических элементах конструкции преобразователя, шумов образующихся за счет магнотрикссионного преобразования электромагнитной энергии в ультразвуковую. В результате обнаруживаемость дефектов практически не повышается.

Существует ряд несоответствий выводов теории и экспериментальных результатов. До настоящего времени не установлены причины нелинейной зависимости амплитуды эхосигналов, отраженных от дискового отражателя от высокочастотного тока в индукторе ЭМАП [52] при прочих равных условиях.

Требуются теоретические исследования физического эффекта появления дополнительных когерентных сигналов между зондирующим и первым донным, а также между любыми двумя донными импульсами при контроле листов, который был обнаружен в 2001 г. [53] и подтвержден в 2016–2017 г. [54–55].

Анализ информационных источников показывает, что основными параметрами, определяющими обнаруживаемость дефектов, являются ток в индукторе и величина индукции магнитного поля ЭМАП. Однако их увеличение оправдано до определенного предела, после которого на результаты УЗК начинают влиять помехи различного типа, в том числе и когерентные с которыми бороться сложно. Известные методы обработки применимы при ЭМА контроле, например, [48], существенно усложняют и удорожают аппаратуру. Поэтому необходим поиск новых технических и технологических решений, которые дадут возможность повысить выявляемость дефектов ОК, в том числе и при скоростном УЗК прокатных изделий, существенно упростить технологию УЗ контроля металлоизделий с применением ЭМАП.

#### Выводы

1. Анализ литературных источников позволил установить продолжающийся мировой интерес к использованию электромагнитно – акустических преобразователей для ультразвукового бесконтактного контроля качества металлопроката.

2. Продолжаются теоретические исследования по разработке общей теории конструирования электромагнитно – акустических преобразователей. Намечались шаги с использованием метода интегральных преобразования обосновать перспективу расчетов конструкций ЭМАП с заданными характеристиками.

3. Разработаны новые электромагнитно – акустических преобразователи, которые позволяют контролировать медные трубки, алюминиевые листы, рельсы, сварные швы и др. ОК.

4. Показана перспективность использования импульсного намагничивания изделий, что позволяет увеличивать индукцию магнитного поля до 2...3 Тл. Однако необходимо решать вопрос подавления шумов Баркгаузена. Кроме того, при контроле ферромагнитных изделий типа труб, заготовок, рельсов, листов и др. необходимо решать вопрос сильного притяжения преобразователя к металлу, а при использовании постоянных магнитов – налипания отслоившейся окалины.

5. Экспериментально показана высокая экономическая эффективность применения устройств и установок для дефектоскопии, особенно при автоматическом контроле больших объемов катаных изделий.

## Список литературы

1. Ермолов И.Н., Ланге Ю.В. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. под общ. ред. В.В. Клюева. Т.3: Ультразвуковой контроль // М.: Изд-во Машиностроение, 2004. 864 с.
2. Бобров В.Т., Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г. Состояние и тенденции развития акустических (ультразвуковых) методов, средств и технологий неразрушающего контроля и технической диагностики // Территория NDT. 2014. №2. С. 24–27.
3. Судакова К.В., Казюкевич И.Л. О повышении эффективности контроля качества металлургической продукции // В мире неразрушающего контроля. 2004. № 3. С. 8–10.
4. Семеренко А.В. Применение ЭМАП для контроля коррозии и эрозии паронагревателей котельных установок // Территория NDT. 2014. №1. С.42–43.
5. Сайт компании Nordinkraft [электронный ресурс] // Режим доступа: www.nordinkraft.de. – (Дата обращения: 23.08.2019)
6. Цапенко В.К., Куц Ю.В. Основы ультразвукового неразрушающего контроля: Підручник. // Київ: Изд-во НТУУ «КПИ», 2010. 448 с.
7. Алешин Н.П., Белый В.Е., Воишкин А.Х., Воицанов А.К., Ермолов И.Н., Гурвич А.К. Методы акустического контроля металлов. Под ред. Алешина Н.П. // М.: Изд-во Машиностроение, 1989. 456 с.
8. Kawashima K., McClung R. Electromagnetic ultrasonic transducer for generating and detecting longitudinal waves (with a small amount of radials polarized transverse // Materials Evaluation, 1976. Vol. 34. No 4. P. 81–90.
9. Сайт All-Pribors. Статистика АО "Votum", Молдова, г.Кишинев [электронный ресурс] // Режим доступа: https://all-pribors.ru/companies/ao-votum-moldova-g-kishinev-1625. – (Дата обращения: 23.08.2019)
10. Сучков Г.М., Петрищев О.Н., Хащина С.В., Десятиченко А.В., Ноздрачева Е.Л. Повышение возможностей бесконтактной дефектоскопии поверхности катаных ферромагнитных изделий // Контроль. Диагностика, 2013. №4. С. 31–35.
11. Муравьева О.В., Муравьев В.В., Стрижак В.А., Кокорина Е.Н., Лойферман М.А. Реальная чувствительность входного акустического контроля прутков-заготовок при производстве пружин // В мире неразрушающего контроля, 2013. №1. С. 62–70.
12. Ермолов И.Н. Достижения в теоретических вопросах ультразвуковой дефектоскопии, задачи и перспективы // Дефектоскопия, 2004. № 10. С. 13–48.
13. Сазонов Ю.И. Электромагнитно-акустические эффекты в конденсированных средах и физические методы их использования // XXVII сессия Российского акустического общества, посв. памяти ученых-акустиков ФГУП «Крыловский государственный научный центр» А.В. Смолякова и В.И. Попкова. С.-Петербург. 16–18 апреля 2014. 17 с.
14. Мужичкий, В.Ф., Комаров В.А. Двойное ЭМАП при электродинамическом механизме преобразования в нормальном поляризуемом поле // Дефектоскопия. 2009. №2. С.67–77.
15. Комаров В.А., Мужичкий В.Ф., Ремезов В.Б. К основам ЭМА толщинометрии с помощью накладных преобразователей. III. Обратное и двойное ЭМАП в нормальном поляризуемом поле // Дефектоскопия. 2007. № 1. С. 64–79.
16. Мужичкий В.Ф., Ремезов В.Б., Комаров В.А. Прямое электродинамическое ЭМАП в нормальном поляризуемом поле. III. Зависимость акустического поля от макроскопических параметров среды преобразования // Дефектоскопия. 2008. №8. С. 21–34.
17. Мужичкий В.Ф., Ремезов В.Б., Комаров В.А. К основам ЭМА толщинометрии с помощью накладных преобразователей. IV. Обратное и двойное ЭМАП в тангенциальном поляризуемом поле // Дефектоскопия. 2007. №2. С.35–52.
18. Ремезов В.Б. Исследование электромагнитных полей, возбуждаемых излучателем типа «виток» // Дефектоскопия. 2013. №7. С.3–12.
19. Муравьева О.В., Муравьев В.В., Мышкин А.В. Влияние конструктивных особенностей противофазных электромагнитно-акустических преобразователей на формирование диаграмм направленности. // Дефектоскопия. 2014. № 9. С. 41–49.
20. Муравьева О.В., Мышкин А.В. Моделирование акустических полей синфазных электромагнитно-акустических преобразователей // Дефектоскопия. 2013. № 12. С. 69–76.
21. Мышкин А.В. Влияние конструктивных параметров многоэлементных фазированных преобразователей на формирование акустических полей. Дис. к.т.н. Ижевск, 2015. 175 с.
22. Муравьева О.В., Кокорина Е.Н., Стерхов В.Д., Малютин Д.В. Моделирование систем подмагничивания электромагнитно-акустических преобразователей объемных волн для контроля пруткового проката // Приборостроение в XXI веке – 2011. Интеграция науки, образования и производства: Сб. материалов VII Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. Ижевск. Изд-во ИжГТУ, 2012. С. 198–202.
23. Фокеева Е. Н. Электромагнитно-акустический зеркально-теневой метод контроля качества прутков из рессорно-пружинной стали. Дис. к.т.н. Ижевск, 2013. 147 с.
24. Петрищев О.Н., Сучков Г.М., Плеснецов С.Ю. Теория и практика электромагнитно-акустического контроля. Часть 1. Теоретические основы расчета и проектирования электроакустических преобразователей электромагнитного типа: монография. – Харків: Видавництво «Оберіг», 2019 – 556 с.
25. Плеснецов С.Ю., Петрищев О.Н., Мигущенко Р.П., Сучков Г.М. Моделирование процесса электромагнитно-акустического преобразования при возбуждении крутильных волн // Технічна електродинаміка. 2017. № 3. С. 79–88.
26. Plesnetsov S.Yu., Petrishchev O. N., Mygushchenko R.P., Suchkov G.M. Simulation of electromagnetic-acoustic conversion process under torsion waves excitation. Part 2 // Tekhnichna Elektrodynamika. 2018. № 1. P. 30–36.
27. Plesnetsov S.Yu., Petrishchev O. N., Mygushchenko R.P., Suchkov G.M. Simulation of electromagnetic-acoustic conversion process under torsion waves excitation. Part 3 // Tekhnichna Elektrodynamika, 2018. No 3. P. 10–19.
28. Plesnetsov S.Yu., Mygushchenko R.P., Petryshev O.N., Suchkov G.M., Khrypunov G.S. Mathematical modeling of physical processes of electromagnetic field transformation in elastic oscillations field in microthick layers of metals // Journal of nano- and electronic physics. 2017. Vol. 9. No 5. 05041 (7pp).
29. Plesnetsov S.Yu., Petrishchev O.N., Mygushchenko R.P., Suchkov G.M., Khrypunova A.L. Physical principles of non-contact ultrasonic frequency sensors creation for the study of nanocrystalline ferromagnetic materials // Journal of Nano- and Electronic Physics. 2018. 5(4), 04001, (9pp).
30. Мигущенко Р.П., Сучков Г.М., Петрищев О.Н., Болух В.Ф., Плеснецов С.Ю., Кочерга А.И. Информационно-измерительные электроакустические преобразователи для оценки качества поверхности ферромагнитных металлоизделий ультразвуковыми волнами Релея // Технічна електродинаміка, 2017. № 2. С. 70–76.
31. Чабанов В. Е., Жуков В. А. Особенности ультразвукового контроля с применением электромагнитно-акустических преобразователей // В мире неразрушающего контроля, 2013. №1. С. 36–43.
32. Zhichao Cai, Suzhen Liu, Chuang Zhang, Oingxin Yang. Microscopic Mechanism and Experiment Research of Electromagnetically Induced Acoustic Emission // IEEE Transactions on Magnetics. November 2015. Vol. 51. No. 11, Code 9401804. 4pps.
33. Shen Wang, Songling Huang, Yu Zhang, Wei Zhao. Multiphysics Modeling of a Lorentz Force-Based Meander Coil Electromagnetic Acoustic Transducer via Steady-State and Transient Analyses // IEEE Sensors Journal, 2016, Vol. 16, No 17. P. 6641 – 6651. DOI: 10.1109/JSEN.2016.2587620.
34. Yong Li, Yi-li Li, Zhen-mao Chen. A fast analytical model of Electromagnetic Acoustic Transducers for evaluation of flat non-magnetic conductors // 2014 IEEE Far East Forum on Nondestructive Evaluation/Testing. IEEE Conference Publications. P. 237 – 241. DOI: 10.1109/FENDT.2014.6928271.
35. Yuedong Xie, G Sergio Rodriguez, Wuliang Yin, Anthony Peyton, Zenghua Liu, Jianna Hao, Qian Zhao, Ben Wang. Simulation and experimental verification of a meander-line-coil electromagnetic acoustic transducers (EMATs). 2016. IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings. Pages: 1 – 6, DOI:10.1109/I2MTC.2016.7520422.
36. Fumio Kojima, Akinori Furusawa, Takafumi Ito. Impact model and control of ultrasonic excitation using electromagnetic acoustic

- transducer // 10th Asian Control Conference (ASCC). IEEE Conference Publications, 2015. P. 1-6. DOI:10.1109/ASCC.2015.7244773.
37. Guo-fu Zhai, Bo Liu, Chao-ran Deng, Yong-qian Li, Lei Kang. An inspection device based on multiple Lamb wave electromagnetic acoustic transducers // 2014 IEEE Far East Forum on Nondestructive Evaluation/Testing. IEEE Conference Publications. P. 14 – 18. DOI: 10.1109/FENDT.2014.6928225.
  38. Wilcox P.D., M. Lowe JS, Cawley P. The excitation and detection of Lamb waves with planar coil electromagnetic acoustic transducers. // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2005, Vol. 52, No. 12. P. 2370 – 2383. DOI: 10.1109/TUFFC.2005.1563281.
  39. Boughedda H., Hacib T., Chelabi M., Acikgoz H., Bihan Y. Le. Electromagnetic Acoustic Transducer for cracks detection in conductive material. // 2015 4th International Conference on Electrical Engineering (ICEE). IEEE Conference Publications. P. 1 – 4. DOI: 10.1109/INTEE.2015.7416717.
  40. Huidong G., Borja L. Разработка одноканальных электромагнитных акустических преобразователей и электромагнитных акустических фазированных решеток для контроля аустенитных швов [электронный ресурс] // Эколинк оборудование. Режим доступа: [http://ekolink.ru/data/1/Austenitic\\_Weld\\_Article.pdf](http://ekolink.ru/data/1/Austenitic_Weld_Article.pdf). – (Дата обращения: 23.08.2019).
  41. Eiji Matsumoto, Shinji Kitamura, Jun Abe. Optimal design of electromagnetic acoustic transducer // The XIX International Conference on Electrical Machines – ICEM 2010. P. 1 – 6. DOI: 10.1109/ICELMACH.2010.5607846.
  42. Kousuke Kanda, Koudai Okazaki, Toshihiko Sugiura. Wire-rope Inspection Using Guided Waves Transmitted by Electromagnetic Acoustic Transducers // 日本AEM 学会誌, 2015. Vol. 23. No.1.
  43. Yamasaki T., Kawabe D., Ohtani T., Hirao M. Flaw Detection in Copper Tubes Using Longitudinal Wave by Electromagnetic Acoustic Transducers // Transactions of the Jap. Soc. of Mechanical Engineers, 2004. No. 70 (690). P. 238– 245.
  44. Costin Vasile, Cornel Ioana. Arc fault detection & localization by electromagnetic-acoustic remote sensing // 2016 IEEE Radio and Antenna Days of the Indian Ocean (RADIO). P. 1–2. DOI:10.1109/RADIO.2016.7772044.
  45. Fei Gao, Xiaohua Feng, Siyu Liu, Ruochong Zhang, Ran Ding, Rahul Kishor, Yuanjin Zheng. Nonlinear electromagnetic-acoustic sensing and imaging. // 2016 IEEE Region 10 Conference (TENCON). IEEE Conference Publications. P. 2017 – 2020. DOI: 10.1109/TENCON.2016.7848379.
  46. Liang Jin, Suzhen Liu, Qingxin Yang, Haiyan Chen, Chuang Zhang. Study of electromagnetic acoustic emission for non-destructive testing. 2008 World Automation Congress. P. 1 – 4.
  47. Alers G. A. Electromagnetic induction of ultrasonic waves: EMAT, EMUS, EMAR [электронный ресурс] // 16th World Conference on NDT. 2004, Montreal, Canada. Режим доступа: [http://www.ndt.net/article/wcndt2004/pdf/non-contact\\_ultrasonics/691\\_alers.pdf](http://www.ndt.net/article/wcndt2004/pdf/non-contact_ultrasonics/691_alers.pdf). – (Дата обращения: 23.08.2019).
  48. McNamara J., Lanza di Scalea F. Improvements in Noncontact Ultrasonic Testing of Rails by the Discrete Wavelet Transform // Materials Evaluation, 2004. No. 62 (3). P. 365-372.
  49. Салам Бусси Е.П., Мишел Кассаблі. Ультразвуковий перетворювач для безконтактного контролю виробів з феромагнітних матеріалів // Матеріали І Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції «Інтеграція освіти, науки та бізнесу в сучасному середовищі: літні диспути». 2019. 1-2 серпня. С. 620–624.
  50. Алехин С.Г. Толщинометрия металлоконструкций на основе электромагнитно-акустического преобразования в импульсном магнитном поле: канд. дис. // М.: МНПО «Спектр», 2013. 95 с.
  51. Сучков Г.М. Развитие теории и практики создания приборов для электромагнитно-акустического контроля металлоизделий: докт. дис. // Харьков, НТУ «ХПИ», 2005. 521 с.
  52. Сучков Г.М., Донченко А.В., Десятниченко А.В., Келин А.А., Ноздрачева Е.Л. Повышение чувствительности ЭМА приборов // Дефектоскопия. 2008. №2. С. 15–22.
  53. Сучков Г.М. Исследование особенностей распространения упругих волн, возбуждаемых ЭМА способом // Контроль. Диагностика. 2001. № 12. С. 36–39.
  54. Бобров В. Т., Шевалдыкин В. Г. Многократные ультразвуковые эхо-сигналы в пластине: анализ и применение [Текст] // В мире неразрушающего контроля. 2016. Т.19. № 1. С. 36–41.
  55. Бобров В. Т., Шевалдыкин В. Г. Многократные ультразвуковые эхо-сигналы в пластине: анализ и применение [Текст] // Технология машиностроения. 2017. № 5. С. 50–54.

## References (transliterated)

1. Ermolov I.N., Lange Yu.V. Nerazrushayushij kontrol: Spravochnik: V 7 t. pod obsh. red. V.V. Klyueva. Vol.3: Ultrazvukovoj kontrol // Moscow.: Izd-vo Mashinostroenie, 2004. – 864 p.
2. Bobrov V.T., Samokrutov A.A., Shevaldykin V.G. Sostoyanie i tendencii razvitiya akusticheskikh (ultrazvukovykh) metodov, sredstv i tehnologij nerazrushayushogo kontrolya i tehnichejskoj diagnostiki // Territoriya NDT. 2014. – No 2. – P. 24–27.
3. Sudakova K.V., Kazyukevich I.L. O povyshenii effektivnosti kontrolya kachestva metallurgicheskoj produkcii // V mire nerazrushayushogo kontrolya. 2004. – No 3. – P. 8–10.
4. Semerenko A.V. Primenenie EMAP dlya kontrolya korrozii i erozii paronagrevatelej kotelnyh ustanovok // Territoriya NDT. 2014. – No1. – P. 42–43.
5. Sajt kompanii Nordinkraft [elektornyj resurs] // Rezhim dostupa: [www.nordinkraft.de](http://www.nordinkraft.de). – (Data obrasheniya: 23.08.2019).
6. Capenko V.K., Kuc Yu.V. Osnovi ultrazvukovogo nerujnivnogo kontrolyu: Pidruchnik. // Kiyiv: Izd-vo NTUU «KPI», 2010. – 448 p.
7. Aleshin N.P., Belyj V.E., Vopilkin A.H., Voshanov A.K., Ermolov I.N., Gurvich A.K. Metody akusticheskogo kontrolya metallov. Pod red. Aleshina N.P. // Moscow.: Izd-vo Mashinostroenie, 1989. – 456 p.
8. Kawashima K., McClung R. Electromagnetic ultrasonic transducer for generating and detecting longitudinal waves (with a small amount of radials polarized transverse // Materials Evaluation, 1976. Vol. 34. No 4. – P. 81–90.
9. Sajt All-Pribors. Statistika AO "Votum", Moldova, Kishinev [elektornyj resurs] // Rezhim dostupa: <https://all-pribors.ru/companies/ao-votum-moldova-g-kishinev-1625>. – (Data obrasheniya: 23.08.2019)
10. Suchkov G.M., Petrishev O.N., Hashina S.V., Desyatnichenko A.V., Nozdracheva E.L. Povysenie vozmozhnostej beskontaktoj defektoskopii poverhnosti katanyh ferromagnitnyh izdelij // Kontrol. Diagnostika, 2013. No4. – P. 31–35.
11. Muraveva O.V., Muravev V.V., Strizhak V.A., Kokorina E.N., Lojferman M.A. Realnaya chuvstvitelnost vhodnogo akusticheskogo kontrolya prutkov–zagotovok pri proizvodstve pruzhin // V mire nerazrushayushogo kontrolya, 2013. No1. – P. 62–70.
12. Ermolov I.N. Dostizheniya v teoreticheskikh voprosah ultrazvukovoj defektoskopii, zadachi i perspektivy // Defektoskopiya, 2004. No 10. – P. 13–48.
13. Sazonov Yu.I. Elektromagnitno-akusticheskie efekty v kondensirovannykh sredah i fizicheskie metody ih ispolzovaniya // XXVII sessiya Rossijskogo akusticheskogo obshchestva, posv. pamyati uchenyh-akustikov FGUP «Krylovskij gosudarstvennyj nauchnyj centr» A.V. Smolyakova i V.I. Popkova. S.-Peterburg. 16–18 aprelya 2014. – 17 p.
14. Muzhickij V.F., Komarov V.A. Dvojnoe EMAP pri elektrodinamicheskom mehanizme preobrazovaniya v normalnom polarizuyushem pole // Defektoskopiya. 2009. No2. – P.67–77.
15. Komarov V.A., Muzhickij V.F., Remezov V.B. K osnovam EMA tolshinometrii s pomoshyu nakladnyh preobrazovatelej. III. Obratnoe i dvojnoe EMAP v normalnom polarizuyushem pole // Defektoskopiya. 2007. No 1. – P. 64-79.
16. Muzhickij V.F., Remezov V.B., Komarov V.A. Pryamoe elektrodinamicheskoe EMAP v normalnom polarizuyushem pole. III. Zavisimost akusticheskogo polya ot makroskopicheskikh parametrov srede preobrazovaniya // Defektoskopiya. 2008. No8. – P. 21–34.
17. Muzhickij V.F., Remezov V.B., Komarov V.A. K osnovam EMA tolshinometrii s pomoshyu nakladnyh preobrazovatelej. IV. Obratnoe i dvojnoe EMAP v tangencialnom polarizuyushem pole // Defektoskopiya. 2007. No2. – P. 35–52.
18. Remezov V.B. Issledovanie elektromagnitnyh polej, vobuzhdaemyh izluchatelem tipa «vitok» // Defektoskopiya. 2013. No7. – P. 3–12.
19. Muraveva O.V., Muravev V.V., Myshkin A.V. Vliyaniye konstruktivnyh osobennostej protivofaznykh elektromagnitno-akusticheskikh preobrazovatelej na formirovaniye diagramm napravlenosti. // Defektoskopiya. 2014. No 9. – P. 41–49.
20. Muraveva O.V., Myshkin A.V. Modelirovaniye akusticheskikh polej sinfaznykh elektromagnitno-akusticheskikh preobrazovatelej //

- Defektoskopiya. 2013. No 12. – P. 69–76.
21. Myshkin A.V. Vliyanie konstruktivnykh parametrov mnogoelementnykh fazirovannykh preobrazovatelej na formirovanie akusticheskikh polej. Dis. k.t.n. Izhevsk, 2015. – 175 p.
  22. Muraveva O.V., Kokorina E.H., Sterhov V.D., Malyutin D.V. Modelirovanie sistem podmagnichivaniya elektromagnitno-akusticheskikh preobrazovatelej obemnykh voln dlya kontrolya prutkovogo prokata // Priborostroenie v XXI veke – 2011. Integraciya nauki, obrazovaniya i proizvodstva: Sb. materialov VII Vserossijskoj nauchno-tehnicheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem. Izhevsk. Izd-vo IzhGTU, 2012. – P. 198–202.
  23. Fokeeva E. N. Elektromagnitno-akusticheskij zerkalno-tenevoj metod kontrolya kachestva prutkov iz resorno-pruzhinnoj stali. Dis. k.t.n.. Izhevsk, 2013. – 147 p.
  24. Petrishev O.N., Suchkov G.M., Plesnecov S.Yu. Teoriya i praktika elektromagnitno-akusticheskogo kontrolya. Chast 1. Teoreticheskie osnovy rascheta i proektirovaniya elektroakusticheskikh preobrazovatelej elektromagnitnogo tipa: monografiya. – Harkiv: Vidavnistvo «Oberig», 2019 – 556 p.
  25. Plesnecov S.Yu., Petrishev O.N., Migushenko R.P., Suchkov G.M. Modelirovanie processa elektromagnitno-akusticheskogo preobrazovaniya pri vzbuzhdenii krutilykh voln // Tehnichna elektrodinamika. 2017. No 3. – P. 79–88.
  26. Plesnecov S.Yu., Petrishev O. N., Mygushchenko R.P., Suchkov G.M. Simulation of electromagnetic-acoustic conversion process under torsion waves excitation. Part 2 // Tekhnichna Elektrodinamika. 2018. No 1. – P. 30–36.
  27. Plesnecov S.Yu., Petrishev O. N., Mygushchenko R.P., Suchkov G.M. Simulation of electromagnetic-acoustic conversion process under torsion waves excitation. Part 3 // Tekhnichna Elektrodinamika, 2018. No 3. – P. 10–19.
  28. Plesnecov S.Yu., Migushchenko R.P., Petryshev O.N., Suchkov G.M., Khrypunov G.S. Mathematical modeling of physical processes of electromagnetic field transformation in elastic oscillations field in microthick layers of metals // Journal of nano- and electronic physics. 2017. Vol. 9. No 5. 05041 (7pp).
  29. Plesnecov S.Yu., Petrishev O.N., Mygushchenko R.P., Suchkov G.M., Khrypunova A.L. Physical principles of non-contact ultrasonic frequency sensors creation for the study of nanocrystalline ferromagnetic materials // Journal of Nano- and Electronic Physics. 2018. 5(4), 04001, (9pp).
  30. Migushenko R.P., Suchkov G.M., Petrishev O.N., Bolyuh V.F., Plesnecov S.Yu., Kocherga A.I. Informacionno-izmeritelnye elektromehaniicheskie preobrazovateli dlya ocenki kachestva poverhnosti ferromagnitnykh metalloizdelij ultrazvukovymi volnami Releya // Tehnichna elektrodinamika, 2017. No 2. – P. 70–76.
  31. Chabanov V. E., Zhukov V. A. Osobennosti ultrazvukovogo kontrolya s primeneniem elektromagnitno-akusticheskikh preobrazovatelej // V mire nerazrushayushogo kontrolya, 2013. No 1. – P. 36–43.
  32. Zhichao Cai, Suzhen Liu, Chuang Zhang, Qingxin Yang. Microscopic Mechanism and Experiment Research of Electromagnetically Induced Acoustic Emission // IEEE Transactions on Magnetics. November 2015. Vol. 51. No. 11, Code 9401804. – 4pgs.
  33. Shen Wang, Songling Huang, Yu Zhang, Wei Zhao. Multiphysics Modeling of a Lorentz Force-Based Meander Coil Electromagnetic Acoustic Transducer via Steady-State and Transient Analyses // IEEE Sensors Journal, 2016, Vol. 16, No 17. P. 6641 – 6651. DOI: 10.1109/JSEN.2016.2587620.
  34. Yong Li, Yi-li Li, Zhen-mao Chen. A fast analytical model of Electromagnetic Acoustic Transducers for evaluation of flat non-magnetic conductors // 2014 IEEE Far East Forum on Nondestructive Evaluation/Testing. IEEE Conference Publications. P. 237 – 241. DOI: 10.1109/FENDT.2014.6928271.
  35. Yuedong Xie, G Sergio Rodriguez, Wuliang Yin, Anthony Peyton, Zenghua Liu, Jianna Hao, Qian Zhao, Ben Wang. Simulation and experimental verification of a meander-line-coil electromagnetic acoustic transducers (EMATs). 2016. IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings. Pages: 1 – 6, DOI:10.1109/I2MTC.2016.7520422.
  36. Fumio Kojima, Akinori Furusawa, Takafumi Ito. Impact model and control of ultrasonic excitation using electromagnetic acoustic transducer // 10th Asian Control Conference (ASCC). IEEE Conference Publications, 2015. P. 1-6. DOI:10.1109/ASCC.2015.7244773.
  37. Guo-fu Zhai, Bo Liu, Chao-ran Deng, Yong-qian Li, Lei Kang. An inspection device based on multiple Lamb wave electromagnetic acoustic transducers // 2014 IEEE Far East Forum on Nondestructive Evaluation/Testing. IEEE Conference Publications. P. 14 – 18. DOI: 10.1109/FENDT.2014.6928225.
  38. Wilcox P.D., M. Lowe JS, Cawley P. The excitation and detection of Lamb waves with planar coil electromagnetic acoustic transducers. // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2005, Vol. 52, No. 12. P. 2370 – 2383. DOI: 10.1109 / TUFFC.2005.1563281.
  39. Boughedda H., Hacib T., Chelabi M., Acikgoz H., Bihan Y. Le. Electromagnetic Acoustic Transducer for cracks detection in conductive material. // 2015 4th International Conference on Electrical Engineering (ICEE). IEEE Conference Publications. P. 1 – 4. DOI: 10.1109/INTEE.2015.7416717.
  40. Huidong G., Borja L. Razrabotka odnokanalnykh elektromagnitnykh akusticheskikh preobrazovatelej i elektromagnitnykh akusticheskikh fazirovannykh reshetok dlya kontrolya austenitnykh shvov [elektronnyj resurs] // Ekolink oborudovanie. Rezhim dostupa: [http://ekolink.ru/data/1/Austenitic\\_Weld\\_Article.pdf](http://ekolink.ru/data/1/Austenitic_Weld_Article.pdf). – (Data obrasheniya: 23.08.2019).
  41. Eiji Matsumoto, Shinji Kitamura, Jun Abe. Optimal design of electromagnetic acoustic transducer // The XIX International Conference on Electrical Machines – ICEM 2010. P. 1 – 6. DOI: 10.1109/ICELMACH.2010.5607846.
  42. Kousuke Kanda, Koudai Okazaki, Toshihiko Sugiura. Wire-rope inspection Using Guided Waves Transmitted by Electromagnetic Acoustic Transducers // 日本AEM学会誌, 2015. Vol. 23. No.1.
  43. Yamasaki T., Kawabe D., Ohtani T., Hirao M. Flaw Detection in Copper Tubes Using Longitudinal Wave by Electromagnetic Acoustic Transducers // Transactions of the Jap. Soc. of Mechanical Engineers, 2004. No. 70 (690). – P. 238– 245.
  44. Costin Vasile, Comel Ioana. Arc fault detection & localization by electromagnetic-acoustic remote sensing // 2016 IEEE Radio and Antenna Days of the Indian Ocean (RADIO). P. 1–2. DOI:10.1109/RADIO.2016.7772044.
  45. Fei Gao, Xiaohua Feng, Siyu Liu, Ruochong Zhang, Ran Ding, Rahul Kishor, Yuanjin Zheng. Nonlinear electromagnetic-acoustic sensing and imaging. // 2016 IEEE Region 10 Conference (TENCON). IEEE Conference Publications. P. 2017 – 2020. DOI: 10.1109/TENCON.2016.7848379.
  46. Liang Jin, Suzhen Liu, Qingxin Yang, Haiyan Chen, Chuang Zhang. Study of electromagnetic acoustic emission for non-destructive testing. 2008 World Automation Congress. – P. 1–4.
  47. Alers G. A. Electromagnetic induction of ultrasonic waves: EMAT, EMUS, EMAR [elektronnyj resurs] // 16th World Conference on NDT. 2004, Monreal, Canada. Rezhim dostupa: [http://www.ndt.net/article/wcndt2004/pdf/non-contact\\_ultrasonics/691\\_alers.pdf](http://www.ndt.net/article/wcndt2004/pdf/non-contact_ultrasonics/691_alers.pdf). – (Data obrasheniya: 23.08.2019).
  48. McNamara J., Lanza di Scalea F. Improvements in Noncontact Ultrasonic Testing of Rails by the Discrete Wavelet Transform // Materials Evaluation, 2004. No. 62 (3). – P. 365–372.
  49. Salam Bussi EP. Mishel Kassabli. Ultrazvukovij peretvoryuvach dlya bezkontaktnogo kontrolyu virobiv z feromagnetnykh materialiv // Materiali i Mizhnarodnoyi naukovo-praktichnoyi internet-konferenciyi «Integraciya osviti, nauki ta biznesu v suchasnomu sere dovishi: litni disputi». 2019. 1-2 serpnia. – P. 620–624.
  50. Alehin S.G. Tolshinometriya metallokonstrukcij na osnove elektromagnitno-akusticheskogo preobrazovaniya v impulsnom magnetnom pole: kand. dis. // M.: MNPO «Spektr», 2013. – 95 p.
  51. Suchkov G.M. Razvitie teorii i praktiki sozdaniya priborov dlya elektromagnitno-akusticheskogo kontrolya metalloizdelij: dokt. dis. // Harkov, NTU «HPI», 2005. – 521 p.
  52. Suchkov G.M., Donchenko A.V., Desyatnichenko A.V., Kelin A.A., Nozdracheva E.L. Povyshenie chuvstvitelnosti EMA priborov // Defektoskopiya. 2008. No2. – P. 15–22.
  53. Suchkov G.M. Issledovanie osobennostej rasprostraneniya uprugih voln, vzbuzhdaemykh EMA sposobom // Kontrol. Diagnostika. 2001. No 12. – P. 36–39.
  54. Bobrov V. T., Shevaldykin V. G. Mnogokratnye ultrazvukovye ehosignaly v plastine: analiz i primenenie [Tekst] // V mire nerazrushayushogo kontrolya. 2016. – Vol.19. – No 1. – P. 36–41.
  55. Bobrov V. T., Shevaldykin V. G. Mnogokratnye ultrazvukovye ehosignaly v plastine: analiz i primenenie [Tekst] // Tehnologiya mashinostroeniya. 2017. No 5. – P. 50–54.

Поступила (received) 05.08.2019

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

**Салам Буссі (Салам Бусси, Salam Bussey)** – аспірантка кафедри комп'ютерних та радіоелектронних систем контролю та діагностики Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна

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

**Мигущенко Руслан Павлович (Мигущенко Руслан Павлович, Migushenko Ruslan Pavlovich)** – доктор технічних наук, проректор з науково-педагогічної роботи, професор Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків. Тел +38(057)706-32-13, e-mail: omsroot@kpi.kharkov.ua

**Кропачек Ольга Юрїївна (Кропачек Ольга Юрьевна, Kropachek Olga Yuryevna)** – доктор технічних наук, доцент кафедри теоретичних основ електротехніки, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна

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

УДК 621.923

*А. С. СЕРГЕЕВ, С. А. ДИТИНЕНКО, Ф. В. НОВИКОВ***ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ОБРАБОТКИ ПРИ ШЛИФОВАНИИ ПУТЕМ УМЕНЬШЕНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ**

Приведены аналитические зависимости для определения условий уменьшения шероховатости поверхности при шлифовании, полученные с позиции теоретико-вероятностного подхода. Показано, что учет вероятностного характера участия зерен круга в резании позволяет более достоверно оценить закономерности формирования шероховатости поверхности при шлифовании. Показано также, что параметр шероховатости  $R_a$ , рассчитанный на основе теоретико-вероятностного подхода, в 3 раза больше аналогичного значения, рассчитанного без учета вероятностного характера участия зерен шлифовального круга в резании. Поэтому применение абразивных инструментов с упорядоченным расположением режущих зерен на его рабочей поверхности позволяет повысить качество обработки за счет уменьшения параметра шероховатости поверхности  $R_a$ . Теоретически и экспериментально установлено, что обеспечение примерно одновысотного расположения режущих зерен на рабочей поверхности шлифовального круга позволяет существенно уменьшить шероховатость поверхности – до уровня, достигаемого при доводке алмазной пастой и абразивном полировании. На этой основе разработана эффективная технология внутреннего шлифования отверстий в пневмо- и гидроцилиндрах с использованием мягкого войлочного круга с наклеенным слоем абразивного порошка 63С 20П, обеспечивающего шероховатость поверхности  $R_a=0,04$  мкм.

**Ключевые слова:** качество обработки, внутреннее шлифование, теория вероятностей, одновысотное расположение режущих зерен, производительность обработки, доводка, абразивное полирование.

*О. С. СЕРГЄЄВ, С. О. ДИТИНЕНКО, Ф. В. НОВІКОВ***ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ОБРОБКИ ПРИ ШЛІФУВАННІ ШЛЯХОМ ЗМЕНШЕННЯ ШОРСТКОСТІ ПОВЕРХНІ**

Наведено аналітичні залежності для визначення умов зменшення шорсткості поверхні при шліфуванні, отримані з позиції теоретико-імовірнісного підходу. Показано, що урахування імовірнісного характеру участі зерен круга в різанні дозволяє більш достовірно оцінити закономірності формування шорсткості поверхні при шліфуванні. Показано також, що параметр шорсткості  $R_a$ , розрахований на основі теоретико-імовірнісного підходу, в 3 рази більше аналогічного значення, розрахованого без урахування імовірнісного характеру участі зерен шліфувального круга в різанні. Тому застосування абразивних інструментів з упорядкованим розташуванням ріжучих зерен на його робочій поверхні дозволяє підвищити якість обробки за рахунок зменшення параметра шорсткості поверхні  $R_a$ . Теоретично й експериментально встановлено, що забезпечення приблизно одновысотного розташування ріжучих зерен на робочій поверхні шліфувального круга дозволяє суттєво зменшити шорсткість поверхні – до рівня, що досягається при доведенні алмазною пастою та абразивному поліруванні. На цій основі розроблено ефективну технологію внутрішнього шліфування отворів в пневмо- та гідроциліндрах з використанням м'якого повстяного круга з наклеєним шаром абразивного порошку 63С 20П, що забезпечує шорсткість поверхні  $R_a = 0,04$  мкм.

**Ключові слова:** якість обробки, внутрішнє шліфування, теорія ймовірностей, одновысотне розташування ріжучих зерен, продуктивність обробки, доведення, абразивне полірування

*O. SERHIEIEV, S. DITINENKO, F. NOVIKOV***IMPROVEMENT OF QUALITY OF PROCESSING WHEN GRINDING BY REDUCING SURFACE ROUGHNESS**

Analytical dependences are given for determining the conditions for reducing the surface roughness during grinding, obtained from the standpoint of the probability-theoretical approach. It is shown that taking into account the probabilistic nature of the participation of grains of the grinding wheel in cutting allows a more reliable assessment of the patterns of formation of surface roughness during grinding. It was also shown that the roughness parameter  $R_a$ , calculated on the basis of the probability-theoretical approach, is 3 times larger than the similar value calculated without taking into account the probabilistic nature of the participation of grinding wheel grains in cutting. Therefore, the use of abrasive tools with an ordered arrangement of cutting grains on its working surface allows improving the quality of processing by reducing the surface roughness parameter  $R_a$ , which is confirmed by numerous practical data. It has been theoretically and experimentally established that providing approximately the same height arrangement of cutting grains on the working surface of the grinding wheel allows reduce surface roughness – to the level achieved when finishing the diamond pass Toy and abrasive polishing. In this case, it becomes possible to carry out preliminary and final processing in one grinding operation, reducing the complexity and increasing the processing productivity. On this basis, an effective operation has been developed for internal grinding of holes in pneumatic and hydraulic cylinders using a soft felt circle with a glued layer of abrasive powder 63С 20P, providing a surface roughness of  $R_a = 0.04 \mu\text{m}$ .

**Keywords:** processing quality, internal grinding, probability theory, single-height arrangement of cutting grains, processing performance, fine-tuning, abrasive polishing.

**Введение.** Повышение качества обработки деталей машин путем уменьшения шероховатости поверхности является одним из важнейших условий создания конкурентоспособной машиностроительной продукции. В связи с этим, вопросам совершенствования абразивной обработки и особенно процессов шлифования, характеризующихся высокой производительностью, постоянно уделяется большое внимание. Это относится к созданию новых характеристик абразивных и алмазных кругов, определению оптимальных условий обработки с учетом ограничений по шероховатости поверхности и

т.д. Вместе с тем, закономерности формирования шероховатости поверхности при шлифовании чрезвычайно сложны и требуют дальнейших глубоких теоретических исследований с применением теории вероятностей. В особой мере это относится к операциям внутреннего шлифования отверстий в пневмо- и гидроцилиндрах, где применяются круги небольшого диаметра, не позволяющие добиться высоких показателей шероховатости поверхности. Поэтому в работе решается актуальная для машиностроения задача аналитического определения

© А. С. Сергеев, С. А. Дитиненко, Ф. В. Новиков, 2019

шероховатости поверхности при шлифовании, выявления и обоснования условий ее уменьшения.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Длительное время при анализе закономерностей формирования шероховатости поверхности при шлифовании подходили с кинематико-геометрических позиций без учета вероятностного участия зерен шлифовального круга в резании [1]. Это ограничивало возможности объективного представления о путях снижения шероховатости поверхности. Поэтому на смену упрощенному кинематико-геометрическому подходу пришел теоретико-вероятностный подход [2–4], позволивший принципиально по-новому решать задачи по определению оптимальных условий шлифования с учетом требований по шероховатости поверхности. Он положен в основу создания новых более эффективных технологий абразивной обработки и особенно процессов шлифования, обеспечивающих, наряду с повышением производительности, более высокие показатели шероховатости поверхности. В результате в ряде случаев удалось предварительное и окончательное шлифование объединить в одну операцию, что позволило снизить трудоемкость и повысить производительность обработки без ухудшения шероховатости поверхности. В связи с этим, важно, используя теоретико-вероятностный подход, обосновать условия уменьшения шероховатости поверхности при шлифовании, в

особенности при внутреннем шлифовании отверстий в пневмо- и гидроцилиндрах.

**Цель работы** – теоретический анализ условий уменьшения шероховатости поверхности на основе вероятностного представления закономерностей участия зерен шлифовального круга в резании.

**Изложение основного материала.** Для решения поставленной задачи следует воспользоваться результатами исследований, приведенных в работе [5]. В ней проведен теоретический анализ параметров шероховатости поверхности  $R_a$  и  $R_{max}$  при неупорядоченном расположении режущих зерен на рабочей поверхности абразивного инструмента и их вероятностном участии в резании (рис 1,а). В основу расчетов положена вероятностная функция  $\Phi(y)$ , определяющая вероятность неснятого материала (в виде микронеровностей) с поверхности образца:

$$\Phi(y) = e^{-\frac{2 \cdot \text{tg} \gamma \cdot n}{B} \cdot y}, \quad (1)$$

где  $\gamma$  – половина угла при вершине конусообразного режущего зерна;  $n$  – количество абразивных зерен, принимающих участие в процессе образования шероховатости поверхности;  $B$  – ширина образца, м;  
 $y$  – координата, отсчитываемая от вершины режущего зерна, м.

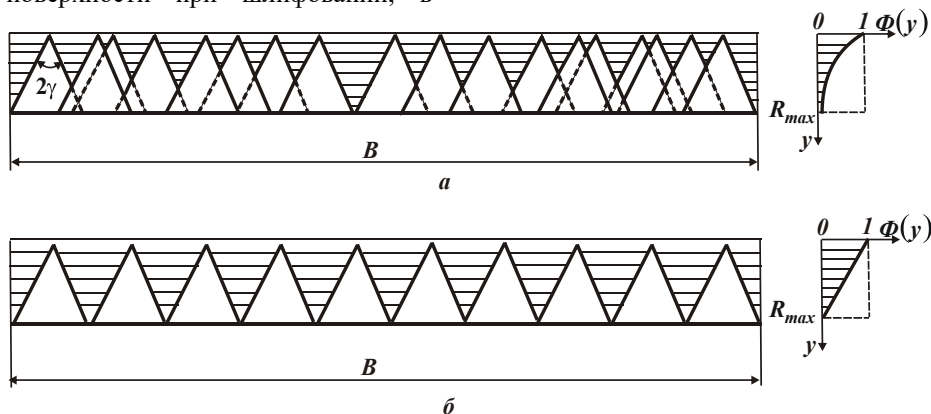


Рис. 1 – Расчетная схема вероятностной функции  $\Phi(y)$ :

а – при неравномерном и б – равномерном расположении проекций зерен

Положение средней линии  $y = a$ , которая разделяет микропрофиль обработанной поверхности на две части, определяется из условия равенства заштрихованных на рис. 2 площадей  $F_1$  и  $F_2$ :

$$a = \int_0^{R_{max}} \Phi(y) \cdot dy = \frac{B}{2 \cdot \text{tg} \gamma \cdot n} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{2 \cdot \text{tg} \gamma \cdot n \cdot R_{max}}{B}} \right). \quad (2)$$

На рис. 2 наибольшая впадина микропрофиля соответствует значению  $y = 0$ , а наибольший выступ микропрофиля – значению  $y = R_{max}$  (рис. 1). Тогда параметр шероховатости поверхности  $R_a$  описывается зависимостью (рис. 2) [5]:

$$R_a = 2 \cdot \int_a^{R_{max}} \Phi(y) \cdot dy = \frac{B}{\text{tg} \gamma \cdot n} \cdot \left( e^{-\frac{2 \cdot \text{tg} \gamma \cdot n \cdot a}{B}} - e^{-\frac{2 \cdot \text{tg} \gamma \cdot n \cdot R_{max}}{B}} \right). \quad (3)$$

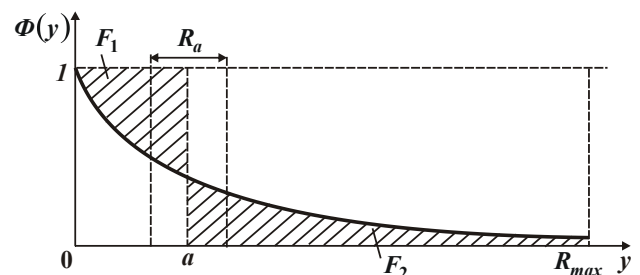


Рис. 2 – Расчетная схема параметра шероховатости поверхности  $R_a$



В действительности, пределом интегрирования экспоненциальной функции  $\Phi(y)$  в зависимостях (2) и (3) следует рассматривать  $y \rightarrow \infty$  вместо  $y = R_{max}$ . Тогда зависимости (2) и (3) примут вид:

$$a = \frac{B}{2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot n}; \quad (4)$$

$$R_a = \frac{0,367 \cdot B}{\operatorname{tg} \gamma \cdot n}. \quad (5)$$

Как видно, параметры  $a$  и  $R_a$  определяются величиной  $n$ : чем она больше, тем меньше  $a$  и  $R_a$ .

При упорядоченном расположении режущих зерен на рабочей поверхности абразивного инструмента и, соответственно, при упорядоченном наложении проекций зерен на диаметральную плоскость обрабатываемого образца (рис. 1,б) функция  $\Phi(y)$  принимает вид:

$$\Phi(y) = 1 - \frac{y}{R_{max}} \quad (6)$$

Подставляя зависимость (6) в (2) и (3), имеем:

$$a = \int_0^{R_{max}} \left(1 - \frac{y}{R_{max}}\right) \cdot dy = \frac{R_{max}}{2}; \quad (7)$$

$$R_a = 2 \cdot \int_a^{R_{max}} \left(1 - \frac{y}{R_{max}}\right) \cdot dy = \frac{R_{max}}{4}. \quad (8)$$

Параметр шероховатости поверхности  $R_{max}$  в данном случае определяется из условия:  $2 \operatorname{tg} \gamma \cdot n \cdot R_{max} = B$ . Откуда

$$R_{max} = \frac{B}{2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot n}. \quad (9)$$

Соответственно

$$a = \frac{B}{4 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot n}; \quad (10)$$

$$R_a = \frac{0,125 \cdot B}{\operatorname{tg} \gamma \cdot n}. \quad (11)$$

Сравнивая зависимости (5) и (11), видно, что при упорядоченном расположении режущих зерен на рабочей поверхности абразивного инструмента и, соответственно, при упорядоченном наложении проекций зерен на диаметральную плоскость обрабатываемого образца (рис. 1,б), параметр шероховатости поверхности  $R_a$  в 3 раза меньше, чем при неупорядоченном наложении проекций зерен на диаметральную плоскость обрабатываемого образца (рис. 1, а). Это указывает на то, что неупорядоченный (вероятностный) характер участия зерен в резании приводит к увеличению параметра шероховатости поверхности  $R_a$  (рис. 3) и, соответственно, к ухудшению качества обрабатываемой поверхности.

Поэтому применение абразивных инструментов с упорядоченным расположением режущих зерен на его рабочей поверхности (например, абразивных лент, т.е. при ленточном шлифовании) позволяет повысить качество обработки за счет уменьшения параметра шероховатости поверхности  $R_a$ , что подтверждается многочисленными практическими данными [6].

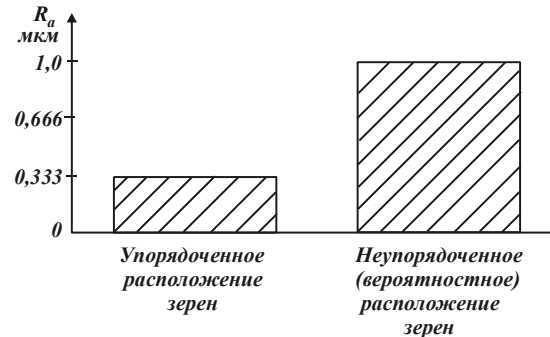


Рис. 3 – Расчетные значения параметра  $R_a$  при упорядоченном и неупорядоченном расположении зерен на рабочей поверхности абразивного инструмента:

$$B = 1 \text{ мм}; \quad \gamma = 45^\circ; \quad n = 3,67 \cdot 10^3 \text{ шт.}$$

В отличие от параметра шероховатости поверхности  $R_a$ , параметр шероховатости поверхности  $R_{max}$  для экспоненциальной функции  $\Phi(y)$ , описываемой зависимостью (1), можно определить лишь с наперед заданной степенью точности. Например, при условии  $y = R_{max}$ , принимая значение  $\Phi(y = R_{max}) = 0,1; 0,01; 0,001$  и т.д. Тогда при условии  $y = R_{max}$  зависимость (1) опишется:

$$R_{max} = - \frac{\ln \Phi(y = R_{max}) \cdot B}{2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot n}. \quad (12)$$

Знак «минус» в зависимости (12) показывает, что функция  $\ln \Phi(y = R_{max})$  является отрицательной.

С учетом зависимостей (12) и (5) отношение  $R_{max} / R_a = -1,362 \cdot \ln \Phi(y = R_{max})$ .

Принимая  $\Phi(y = R_{max}) = 0,1$ , имеем  $\ln \Phi(y = R_{max}) = -2,3$ . Тогда:

$$R_{max} = \frac{1,15 \cdot B}{\operatorname{tg} \gamma \cdot n}; \quad \frac{R_{max}}{R_a} = 3,133.$$

Принимая  $\Phi(y = R_{max}) = 0,01$ , имеем  $\ln \Phi(y = R_{max}) = -4,6$ . Соответственно:

$$R_{max} = \frac{2,3 \cdot B}{\operatorname{tg} \gamma \cdot n}; \quad \frac{R_{max}}{R_a} = 6,266.$$

С уменьшением значения  $\Phi(y = R_{max})$  параметр  $R_{max}$  и отношение  $R_{max} / R_a$  увеличиваются, причем, в неограниченных пределах. Поэтому установить истинные значения параметра  $R_{max}$  и  $R_{max} / R_a$  можно, используя иные условия. Например,

рассматривая упорядоченное расположение зерен на рабочей поверхности инструмента (рис. 1,б). В этом случае, согласно зависимости (8), параметр  $R_{max} = 4R_a$ . Однако в реальных условиях абразивной обработки, как правило, имеет место неупорядоченное расположение режущих зерен на рабочей поверхности абразивного инструмента (рис. 1, а). Поэтому закономерности формирования шероховатости поверхности следует рассматривать с позиции теории вероятностей. С учетом зависимости (5) вероятностную функцию  $\Phi(y)$ , описываемую зависимостью (1), можно представить в виде:

$$\Phi(y) = e^{-\frac{0,734}{R_a}y} \quad (13)$$

Очевидно, чем больше параметр шероховатости поверхности  $R_a$ , тем меньше значение функции  $\Phi(y)$ . Поэтому при абразивном полировании, характеризующемся меньшими значениями  $R_a$  по сравнению с шлифованием, функция  $\Phi(y)$  будет принимать меньшие значения (рис. 4,а), а функция  $\varepsilon(y) = 1 - \Phi(y)$ , наоборот, большие значения (рис. 4,б). Подтверждением тому являются экспериментальные графики изменения классической функции – относительной опорной длины микропрофиля обработанной поверхности  $t_p$  (в %) после различных методов обработки (рис. 5 [5]). Они указывают на то, что при абразивном полировании достигается наименьшее значение шероховатости обработанной поверхности.

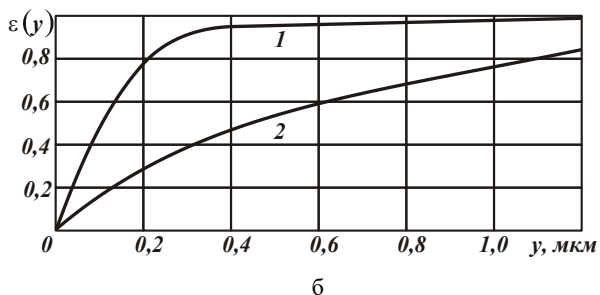
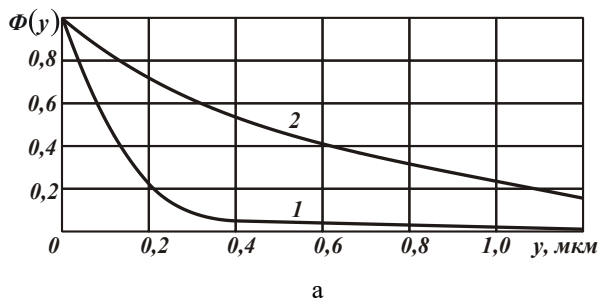


Рис. 4 – Графики изменения функций  $\Phi(y)$  и  $\varepsilon(y)$ :

1 –  $R_a = 0,1$  мкм; 2 –  $R_a = 0,5$  мкм

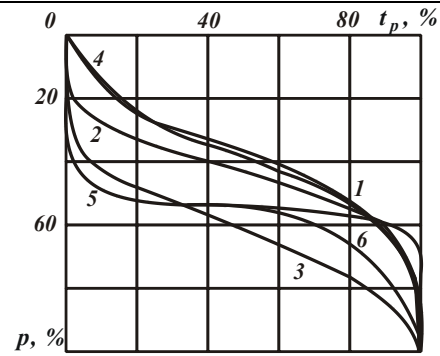


Рис. 5 – Относительные опорные длины микропрофиля обработанной поверхности  $t_p$  (в %)

образцов из сплава АМг4 после различных методов обработки: 1 – прокат (выходная поверхность);

2 – гидроабразивная обработка; 3 – точение;

4 – фрезерование; 5 – абразивное полирование;

6 – точение алмазом

Приведенные на рис. 5 графики функции  $t_p$  (в %) соответствуют графику изменения функции  $\varepsilon(y) = 1 - \Phi(y)$ , рис. 4. Для этого следует рассматривать координату  $y$  направленной в противоположную сторону, т.е. вниз с вершины наибольшей микронеровности. По мере увеличения координаты  $y$  функция  $\varepsilon(y) = 1 - \Phi(y)$  непрерывно увеличивается, асимптотически приближаясь к значению 1. Исходя из рис. 5, при абразивном полировании функция  $t_p$  увеличивается незначительно, а затем фактически при одинаковом значении  $y$  увеличивается почти от 0 до 1 и далее лишь асимптотически неограниченно приближается к значению 1. По сути, значение координаты  $y$ , при котором происходит резкое увеличение функции  $t_p$ , определяет положение средней линии микропрофиля обработанной поверхности  $y = a$  (рис. 2). Такое резкое увеличение функции  $t_p$  фактически от 0 до 1 указывает на весьма малое значение параметра шероховатости поверхности  $R_a$ , равное 0,1 мкм.

Наблюдаемое небольшое увеличение функции  $t_p$  на участке, предшествующем ее резкому увеличению фактически от 0 до 1, связано с наличием небольшого количества зерен, имеющих большую высоту выступания по сравнению с основной массой зерен. Следовательно, резкое изменение функции  $t_p$  в диапазоне от 0 до 1 объясняется участием в резании большого количества абразивных зерен, имеющих приблизительно одинаковую высоту выступания над уровнем рабочей поверхности абразивного инструмента. Поэтому эффект абразивного полирования состоит в первую очередь в возможности обеспечения фактически одновысотного расположения абразивных зерен на рабочей поверхности абразивного инструмента.

На рабочей поверхности шлифовального круга режущие зерна расположены разновысотно. В результате происходит разновысотное участие зерен в

резании. Это приводит к увеличению параметров шероховатости поверхности  $R_a$ ,  $R_{max}$  и ухудшению качества обработки.

Таким образом показано, что при абразивном полировании можно добиться существенного уменьшения шероховатости обрабатываемой поверхности. Однако при этом продолжительность обработки достаточно высокая. Так, установлено, что продолжительность операции круглого наружного шлифования твердосплавного режущего инструмента (развертки) составляет 1 ... 5 мин при съеме припуска до 2 мм. Продолжительность операции доводки алмазной пастой этого инструмента при съеме припуска 0,02 мм составляет от 3 до 12 мин и более. Как видно, процесс шлифования более производителен, однако требует изыскания путей уменьшения шероховатости поверхности до уровня, достигаемого при доводке и абразивном полировании.

Одним из эффективных направлений решения такой задачи применительно к внутреннему шлифованию может быть использование мягкого войлочного (фетрового) круга с наклеенным слоем абразивного порошка 63С 20П [7]. Экспериментально установлено, что в этом случае за 30 минут шлифования достигается шероховатость поверхности  $R_a=0,04$  мкм. Это открывает новые возможности существенного уменьшения параметра шероховатости поверхности  $R_a$  без увеличения трудоемкости и уменьшения производительности обработки. Также эффективно внутреннее шлифование производить, устанавливая ось вращения шлифовального круга с индивидуальным приводом перпендикулярно оси вращения обрабатываемого отверстия. Это позволяет увеличить площадь контакта круга с обрабатываемой поверхностью и изменить направление образования рисок от проработавших зерен. Они образуются вдоль обрабатываемой поверхности, что повышает работоспособность пневмо- и гидроцилиндров.

**Выводы.** Приведены аналитические зависимости для определения условий уменьшения шероховатости поверхности при шлифовании, полученные с позиции теоретико-вероятностного подхода. Показано, что учет вероятностного характера участия зерен шлифовального круга в резании позволяет более достоверно оценить закономерности формирования шероховатости поверхности при шлифовании. Теоретически и экспериментально установлено, что обеспечение примерно одновысотного расположения режущих зерен на рабочей поверхности шлифовального круга позволяет существенно уменьшить шероховатость поверхности – до уровня, достигаемого при доводке алмазной пастой и абразивном полировании. На этой основе разработана эффективная операция внутреннего шлифования

отверстий в пневмо- и гидроцилиндрах с использованием мягкого войлочного круга с наклеенным слоем абразивного порошка 63С 20П, обеспечивающего шероховатость поверхности  $R_a=0,04$  мкм.

#### Список литературы

1. Маслов Е.Н. Теория шлифования металлов / Е.Н. Маслов. – М.: Машиностроение, 1974. – 319 с.
2. Шероховатость поверхностей (теоретико-вероятностный подход) / А.П. Хусу, Ю.Р. Витенберг, В.А. Пальмов. – М.: Гл. ред. физ.-мат. литературы изд-ва "Наука", 1975. – 344 с.
3. Королев А. В. Исследование процессов образования поверхностей инструмента и детали при абразивной обработке / А. В. Королев. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1975. – 212 с.
4. Новоселов Ю. К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке / Ю. К. Новоселов. – Саратов, 1979. – 232 с.
5. Новиков Ф. В. Основи обробки металевих виробів з оптичними властивостями : монографія / Ф.В. Новіков, В.Г. Шкурупій. – Харків: ХНЕУ ім. С. Кузнеця, 2015. – 388 с.
6. Якимов А.В. Оптимизация процесса шлифования / А.В. Якимов. – М.: Машиностроение, 1975. – 175 с.
7. Новиков Ф. В., Андилахай А. А., Сергеев А. С. Условия уменьшения шероховатости поверхности при финишной абразивной обработке отверстий в цилиндрах // Качество, стандартизация, контроль: теория и практика: Материалы 19-й Международной научно-практической конференции, 09–13 сентября 2019 г., Одесса.–Киев: АТМ Украины, 2019. – С. 96–98.

#### References (transliterated)

1. Maslov Ye. N. Teoriya shlifovaniya metallov [Theory of grinding metals]. Moscow, Mashinostroyeniye, 1974. – 319 p.
2. Khusu A. P., Vitenberg YU. R., Pal'mov V. A. Sherokhovatost' poverkhnostey (teoretiko-veroyatnostnyy podkhod) [Roughness of surfaces (probability-theoretical approach)]. Moscow, Glavnaya redaktsiya fiziko-matematicheskoy literatury izdatel'stva "Nauka", 1975. – 344 p.
3. Korolev A. V. Issledovaniye protsessov obrazovaniya poverkhnostey instrumenta i detali pri abrazivnoy obrabotke [Investigation of the processes of formation of tool surfaces and parts during abrasive processing]. Saratov, Izdatel'stvo Sarat. Un-ta, 1975. – 212 p.
4. Novoselov YU. K. Dinamika formoobrazovaniya poverkhnostey pri abrazivnoy obrabotke [Dynamics of surface formation during abrasive processing]. Saratov, 1979. – 232 p.
5. Novikov F. V., V. H. Shkurupiy. Osnovy obrobky metalevykh vyrobiv z optychnyimi vlastyvostyamy : monohrafiya [Fundamentals of Processing Metal Products with Optical Properties: Monograph]. Kharkiv, Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics, 2015. – 388 s.
6. Yakimov A. V. Optimizatsiya protsessa shlifovaniya [Optimization of the grinding process]. Moscow, Mashinostroyeniye, 1975. – 175 p.
7. Novikov F. V., Andilakhay A. A., Sergeev A. S. Usloviya umen'sheniya sherokhovatosti poverkhnosti pri finishnoy abrazivnoy obrabotke otverstiy v tsilindrakh [Conditions for reducing surface roughness during finishing abrasive treatment of holes in cylinders]. Kachestvo, standartizatsiya, kontrol': teoriya i praktika: Materialy 19-y Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, 09–13 sentyabrya 2019, g. Odessa [Quality, standardization, control: theory and practice: Materials of the 19th International Scientific and Practical Conference, September 09–13, 2019, Odessa.]. Kiyev, АТМ Ukrainy, 2019. P. 96–98.

Поступила (received) 01.11.2019

---

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

**Сергєєв Олександр Сергійович (Сергеев Александр Сергеевич, Serhieiev Alexander)** – аспірант кафедри «Технологія машинобудування», ДВНЗ «ПДТУ», м. Маріуполь; тел.: 067-68-90-342; e-mail: fokusnic1@rambler.ru

**Дитиненко Станіслав Олександрович (Дитиненко Станислав Александрович, Ditinenko Stanislav)** – 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 ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5382-2276>

**Новіков Федір Васильович (Новиков Федор Васильевич, Novikov Fedir)** – 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: novikovfv@i.ua ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6996-3356>

УДК 681.586

**Ю. О. СМОЛІН****УНІВЕРСАЛЬНИЙ ДАТЧИК ЧАСТОТИ ОБЕРТАННЯ**

Розглянуто вимоги до сучасних датчиків частоти обертання. Виділено діапазон частоти обертання різних вузлів електромеханічних систем. Виділено, що однією з найважливіших вимог до датчиків частоти обертання, що використовуються у складі комп'ютерних контрольно-діагностичних систем, є їх універсальність. Наведено структурну схему розробленого датчика. Описано метод вимірювання швидкості обертання та конструкція датчика. При підготовці експеримента визначені: факторні рівні; взаємозв'язок факторів; фактор основної групи і фактор підгрупи; інтервали між вимірюваннями. Проведено рандомізацію значення аргументів багатфакторного експерименту. Складено план-матрицю проведення експеримента. Наведено структурну схему експериментальної установки. Обрані засоби контролю і вимірювання. Отримані експериментальні залежності максимальної відстані включення датчика від товщини сигнальної пластини для різних матеріалів цієї пластини.

**Ключові слова:** датчик частоти обертання, первинний перетворювач, сигнальна пластинка, план-матриця експеримента, експериментальна установка, відстань включення датчика.

**Ю. А. СМОЛИН****УНІВЕРСАЛЬНИЙ ДАТЧИК ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ**

Рассмотрены требования к современным датчикам частоты вращения. Выделен диапазон частоты вращения различных узлов электромеханических систем. Отмечено, что одним из самых важных требований к датчикам частоты вращения, используемых в составе компьютерных контрольно-диагностических систем, является их универсальность. Приведена структурная схема разработанного датчика. Описан метод измерения скорости вращения и конструкция датчика. При подготовке эксперимента определены: факторные уровни; взаимосвязь факторов; фактор основной группы и фактор подгруппы; интервалы между измерениями. Проведена рандомизация значения аргументов многофакторного эксперимента. Составлена план-матрица проведения эксперимента. Приведена структурная схема экспериментальной установки. Выбраны средства контроля и измерения. Получены экспериментальные зависимости максимального расстояния включения датчика от толщины сигнальной пластины для различных материалов этой пластины.

**Ключевые слова:** датчик частоты вращения, первичный преобразователь, сигнальная пластинка, план-матрица эксперимента, экспериментальная установка, расстояние включения датчика.

**Yu. O. SMOLIN****UNIVERSAL RPM SENSOR**

The requirements for modern speed sensors are considered. The range of rotational speed of various nodes of electromechanical systems is highlighted. The parameters of the speed sensors are determined, which are most often investigated and the main stages of the multi-stage process of studying these parameters are considered. It is noted that one of the most important requirements for speed sensors used in computer control and diagnostic systems is their versatility. The block diagram of the developed sensor is given. The method of measuring the speed of rotation and the design of the sensor are described. In this case, the main attention is paid to the analog part of the sensor, i.e., to a measuring transducer containing three nodes: a primary inductive transducer, an oscillation generator, and an amplifier. Timing diagrams explaining the principle of operation of the inductive measuring transducer and all the parameters of this transducer are given. When preparing the experiment, the following were determined: factor level; correlation of factors; main group factor and subgroup factor; intervals between measurements. The randomization of the value of the arguments of a multivariate experiment was carried out. An experimental matrix has been compiled. The block diagram of the experimental setup is given. Selected controls and measurements. Experimental dependences of the maximum distance of the sensor on the thickness of the signal plate for various materials of this plate are obtained.

**Keywords:** speed sensor, primary converter, signal plate, expert matrix, experimental setup, sensor switching distance.

**Вступ.** Сучасні засоби вимірювань застосовуються у всіх, без винятку, галузях науки і техніки, в тому числі й в комп'ютерних та радіоелектронних системах контролю та діагностики. Застосування таких систем стало своєрідним індикатором і гарантом якості і надійності при створенні та експлуатації нової техніки.

Серед найбільш важливих параметрів, які необхідно визначити в процесі експлуатації електромеханічних пристроїв і систем, є кутова швидкість переміщення або, іншими словами, частота обертання. Сучасні цифрові датчики частоти обертання, що надходять до складу комп'ютерних та радіоелектронних систем контролю та діагностики піддаються різним випробуванням, основною метою яких є забезпечення високої якості датчиків при випуску їх з виробництва та достовірності результатів вимірювань, що виконуються з допомогою цих пристроїв споживачем [1]. Такий цифровий датчик

частоти обертання було розроблено на кафедрі КРСКД НТУ «ХПІ».

**Постановка проблеми.** Діапазон частоти обертання обертових деталей і вузлів різних механізмів досить широкий – від десятків часток до декількох десятків тисяч обертів на хвилину. Для вимірювання частоти обертання таких діапазонів застосовується велика кількість різних датчиків, які використовують різні методи вимірювання. Залежно від вузла і його призначення, до датчиків пред'являються неоднакові вимоги. В одних випадках від датчиків потрібна підвищена точність, в інших – головне цифровий вихід, в третіх, – здатність витримувати вібро-, термо-перевантаження та ін. [1, 2].

Експериментальні дослідження датчиків найчастіше зводяться до визначення дійсних значень чутливості, похибок та інших метрологічних характеристик [3, 4]. Процес цей багатоетапний і включає декілька основних стадій: формується мета

дослідження; визначаються величини – чинники, що впливають на властивості об'єкта та їхній вигляд взаємозв'язку; будується план експерименту. Важливим моментом є також питання вибору технічних засобів, особливо вимірювальних, та узгодження їх.

Однією з найважливіших вимог до датчиків частоти обертання, що використовуються у складі комп'ютерних контрольно–діагностичних систем, є їх універсальність, тобто спроможність спрацьовувати в різних умовах, на різній відстані від об'єкта вимірювання та незалежно від матеріалу з якого виготовлено цей об'єкт.

**Мета роботи.** Експериментальним шляхом визначити відстань включення датчика частоти обертання в залежності від товщини сигнальної пластини і її матеріалу та оцінити спроможність використання датчика в комп'ютерних системах контролю та діагностики різного призначення.

**Основна частина.** Досліджуваний датчик є датчиком індуктивного типу і використовує частотний метод вимірювання швидкості обертання, при якому вимірювальний перетворювач перетворює швидкість обертання в частоту електричних імпульсів. Частотний метод вимірювання швидкості обертання признаний найбільш точним і досконалим [1, 2].

Індуктивний датчик виконаний в односторонньому «торчковому» вигляді, коли робоча зона знаходиться перед торчком датчика.

Відстань спрацьовування такого датчика залежить не тільки від відстані між датчиком і сигнальною пластиною, але і від розмірів самої пластини, і матеріалу, з якого зроблена сама сигнальна пластина.

Пропонуємий цифровий датчик частоти обертання, як конструктивно, так і схемотехнічно складається з двох частин.

Перша частина – аналогова, представляє собою вимірювальний перетворювач, призначений для перетворення механічної величини кутового переміщення в електричну величину – імпульси струму. Ця частина встановлюється в безпосередній близькості від обертового вала.

Друга частина – цифрова, являє собою ряд дискретних елементів, об'єднаних у кілька вузлів, призначених для організації підрахунку імпульсів, що відповідають кількості оборотів обертового механізму за певний проміжок часу. Ця частина конструктивно виконана окремо від аналогової і винесена за межі досліджуваного об'єкта.

Аналогова частина, тобто вимірювальний перетворювач, містить три вузла: первинний індуктивний перетворювач, генератор коливань та підсилювач.

У такому вимірювальному перетворювачі сигнальна металева пластина, що виконує роль якоря і жорстко пов'язана з валом, переміщується відносно осердя і розташованої на ньому обмотки. Ця обмотка вмикається в ланцюг генератора і зміна параметрів обмотки викликає зміну режиму роботи генератора, тобто перехід від режиму генератора до зриву генерації. Вихідний сигнал генератора коливань нормується за допомогою підсилювача. Таким чином, на виході вимірювального перетворювача формується один імпульс за один оберт валу.

Далі ці імпульси надходять в цифрову частину датчика, де відбувається підрахунок числа імпульсів і індикація отриманого результату.

Структурна схема цього датчика наведена на рис. 1.

Первинний перетворювач індуктивного типу являє собою індуктивність, виконану на основі феритової чашки типу на якій намотана мідним дротом котушка. Його параметри наведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Параметри індуктивного первинного перетворювача

Параметр або вузол	Кількісне або якісне значення
Кількість конструктивних часток	2
Мінімальні розміри сигнальної пластини від котрої повинен спрацьовувати вимірювальний перетворювач, мм	
Матеріал пластини	9x15x0,5
Феритова чашка індуктивного перетворювача	Сталь, алюміній, латунь
Зовнішній діаметр чашки, мм	Тип Б9
Внутрішній діаметр чашки, мм	8
Висота чашки, мм	2
Кількість витків котушки	4
Діаметр проводу котушки, мм	380
Напруга живлення, В	0,08
Максимальний струм споживання, не більш мА	+5
Габаритні розміри вимірюючого перетворювача:	10
- довжина, мм	40
- ширина, мм	15
- висота, мм.	15

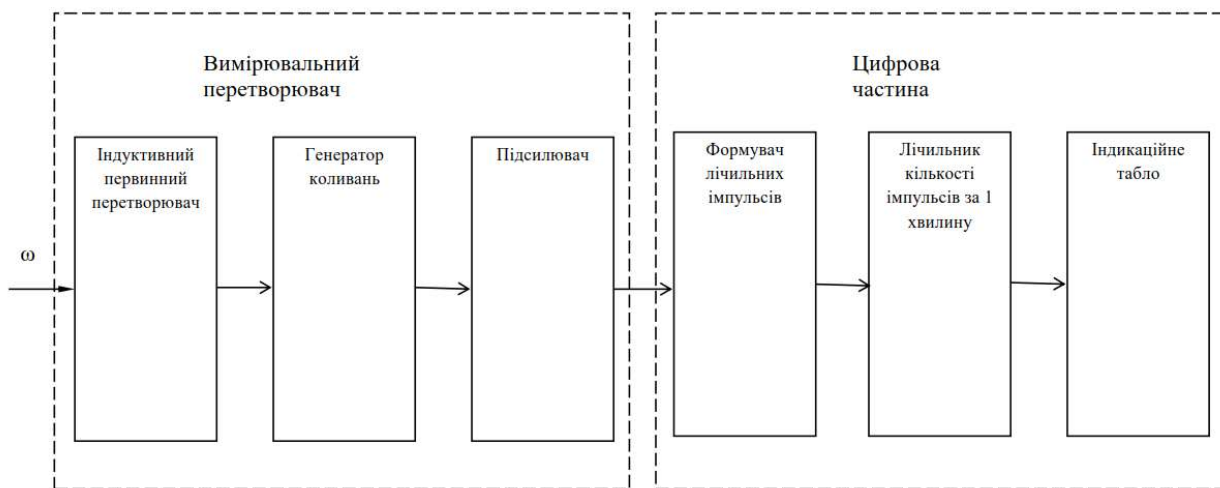


Рис. 1 – Структурна схема датчика частоти обертання

Генератор синусоїдальних коливаний реалізовано на коливальному LC контурі з транзисторним зворотним зв'язком для підтримки коливаний у контурі. Генератор також має термостабілізацію для стійкої роботи генератора в широкому діапазоні температур.

При проходженні сигнальної пластини рядом з торчком датчика відбувається стійкий зрив генерації

коливаний генератора. Схема підсилювача постійного струму працює в ключовому режимі, що забезпечує формування прямокутного вихідного імпульса.

Суть роботи такого перетворювача відображає часова діаграма приведена на рис. 2.

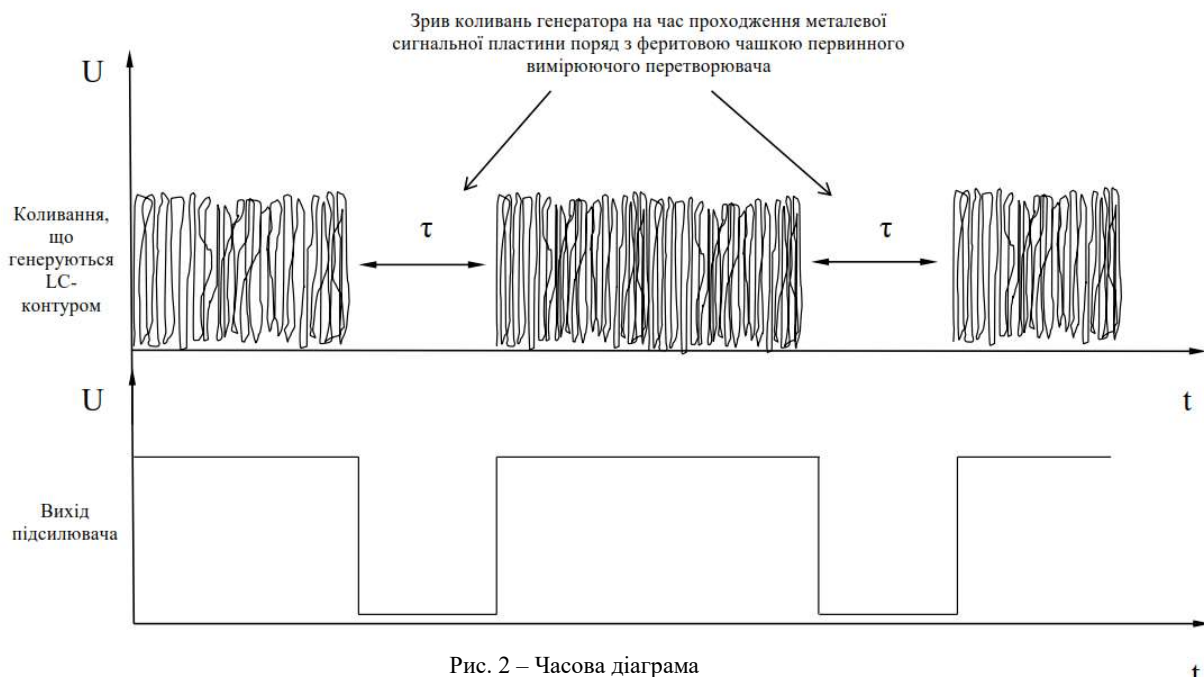


Рис. 2 – Часова діаграма

Оскільки відстань включення датчика залежить від декількох величин, таких як товщина сигнальної пластини і її матеріал, то експеримент по визначенню відстані включення датчика кваліфікується як багатофакторний. В цьому разі при проведенні експериментальних досліджень необхідно [5,6]:

- визначити факторні рівні;
- визначити взаємозв'язок факторів і провести їх класифікацію, встановивши фактор основної групи і фактор підгрупи;
- визначити інтервал між експериментами вимірюваннями;

г) вибрати тип активного експерименту та відповідний йому метод складання план-матриці експерименту;

д) провести рандомізацію значення аргументів багатофакторного експерименту;

е) скласти план-матрицю проведення експерименту;

ж) за складеною план-матрицею на виготовленій експериментальній установці та обраному обладнанні провести експериментальні дослідження.

Основною метою експериментальних досліджень було визначення залежності відстані включення X (тобто відстані від торчкової поверхні датчика до



сигнальної пластини, при якому починає відбуватися зрив генерації в первинному вимірювальному перетворювачі і на його виході з'являється імпульс) від товщини сигнальної пластини  $h$  і матеріалу з якого вона виготовлена  $M$ . Таким чином, величина  $X$  є функцією двох змінних  $X = f(h, M)$ . Отже, відстань включення буде залежати від двох груп даних і експеримент з визначення відстані включення є двофакторним.

При визначенні рівнів факторів і їх класифікації у нашому випадку виходили з того, що:

– по-перше, задані різні матеріали сигнальної пластини і саме для кожного з них слід визначити

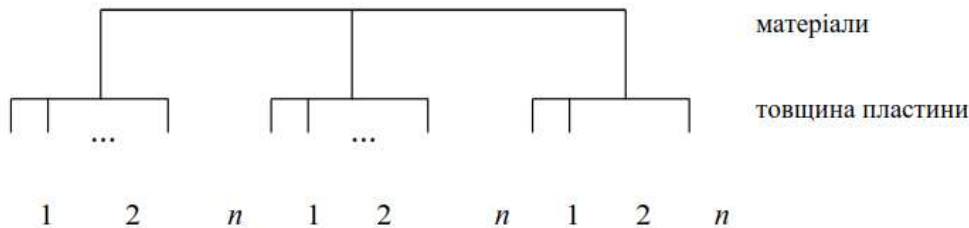


Рис. 3 – Двофакторна ієрархічна класифікація

У реальних вузлах і механізмах, де необхідно виміряти частоту обертання зазвичай товщина сигнальних (маркерних) пластин для індуктивних датчиків не перевищує  $3 \div 5$  мм. Зазвичай мінімальна товщини пластини складає 0,5 мм [2,3]. Тому для проведення експериментальних досліджень застосовували максимальну товщину пластини відповідну 3 мм.

Для ідеального вибору інтервалів між вимірами, з метою отримання експериментальної характеристики з максимальною точністю необхідно заздалегідь знати закон зміни цієї характеристики. Судячи з літературних даних [3,7,8] це залежності або близькі до лінійних, або наближаються до пологих парабол.

В цьому випадку можна керуватися загальноприйнятим правилом [3,7,9], суть якого полягає в тому, що для отримання експериментальної залежності близької до лінійної досить проводити вимірювання з кроком на порядок нижче, ніж верхня межа вимірюваної величини.

Враховуючи, що ми взяли максимальну товщину пластини 3 мм, інтервал між вимірами не повинен перевищувати 0,3 мм.

Згідно вищевикладеному було прийнято:

а) інтервал між експериментальними вимірами постійним;

б) величина інтервалу вимірювання товщини пластини  $\Delta h = 0,25$  мм.

Оскільки в кожному вимірі необхідно змінювати один чинник – товщину сигнальної пластини для кожного з пропонувананих матеріалів пластини (сталь, латунь і алюміній) було застосовано план класичного експерименту. У цьому випадку, план-матриця

відстань включення датчика. Отже, фактором основної групи було визначено матеріал пластини  $M$ , а фактором підгрупи товщина пластини  $h$ ;

– по-друге, ці фактори впорядковані за ієрархією (є фактори основної групи і підгрупи), отже, взаємозв'язок факторів буде ієрархічним.

Таким чином, на верхньому рівні основний фактор «матеріал» буде мати три групи – сталь, латунь, алюміній, які пов'язані з факторами підгрупи – товщиною пластини. Таку схему двофакторної ієрархічної класифікації можна представити у вигляді показаному на рис. 3.

проведення експерименту у загальному випадку буде мати вигляд показаний у табл. 2..

Таблиця 2 – Принцип складання план-матриці проведення експерименту

Матеріал пластини (M)	Товщина пластини (h)			
Сталь	$h_1$	$h_2$	....	$h_i$
Латунь	$h_1$	$h_2$	....	$h_i$
Алюміній	$h_1$	$h_2$	....	$h_i$

Така план-матриця встановлює умову проведення дослідів (зі сталлю, латунної або алюмінієвої пластини) і кількість дослідів у кожному випадку (від 1 до  $i$ ).

Однак якщо проводити виміри в тому послідовному порядку, в якому йдуть рядки матриці наведеною на рисунку 4, то в цьому випадку може виникати систематична похибка. З цього випливає, що збільшувати товщину пластини слід у випадковому порядку, тобто необхідно рандомізувати проведення вимірів.

Рандомізацію було проведено найбільш поширеним методом генерації псевдовипадкових чисел [4, 5, 6].

Сигнальні пластини обирались з різних матеріалів: сталь, латунь і алюміній (сталь 3413; сталь 20X13; сталь 10КП; латунь Л63; сплав Д16). Для кожного матеріалу було проведено рандомізацію. В результаті була отримана рандомізована план-матриця проведення двофакторного класичного експерименту по дослідженню відстані включення датчика частоти обертання наведена в табл. 3.

Таблиця 3 – Рандомізована план-матриця проведення двофакторного класичного експерименту по дослідженню відстані включення датчика частоти обертання

Основні фактори, м (матеріали з яких виготовлено пластину)	Фактори підгруп, h (товщина сигнальної пластини, мм)										
Сталь 3413	1,25	1,75	0,50	2,50	2,25	1,00	2,00	2,75	0,75	3,00	1,50
Сталь 20X13	1,00	1,75	0,75	2,25	2,00	0,50	1,50	3,00	2,50	2,75	1,25
Сталь 10КП	0,75	1,25	2,00	2,50	1,50	2,25	0,50	1,00	1,75	3,00	2,75
Латунь Л63	2,75	0,50	3,00	1,00	0,75	1,25	2,50	2,00	2,25	1,50	1,75
Сплав Д16	1,50	3,00	1,00	0,50	2,50	2,75	2,25	0,75	1,25	1,75	2,00

Для проведення експериментальних досліджень була створена експериментальна установка, схема якої приведена на рис. 4.

Вона включає в себе два нестандартних пристрої:

1) пристрій кріплення датчика з вузлом жорсткого фіксування перетворювача, що представляє собою станину з штативом, в якому за допомогою гвинтових затисків вимірювальний перетворювач жорстко зафіксований у просторі за двома координатами співвісно з валом електроприводу сигнальної пластини

та спеціальним регулювальним гвинтом, який, в свою чергу, забезпечує переміщення датчика в просторі по третій координаті і дозволяє вимірювати відстань між торчком вимірювального перетворювача датчика і сигнальною пластиною;

2) пристрій переміщення сигнальної пластини з електричним двигуном, на валу якого встановлено текстолітовий диск і на якому, в свою чергу, жорстко закріплена сигнальна пластина з набору знімних сигнальних пластин, які кріпляться до диску.

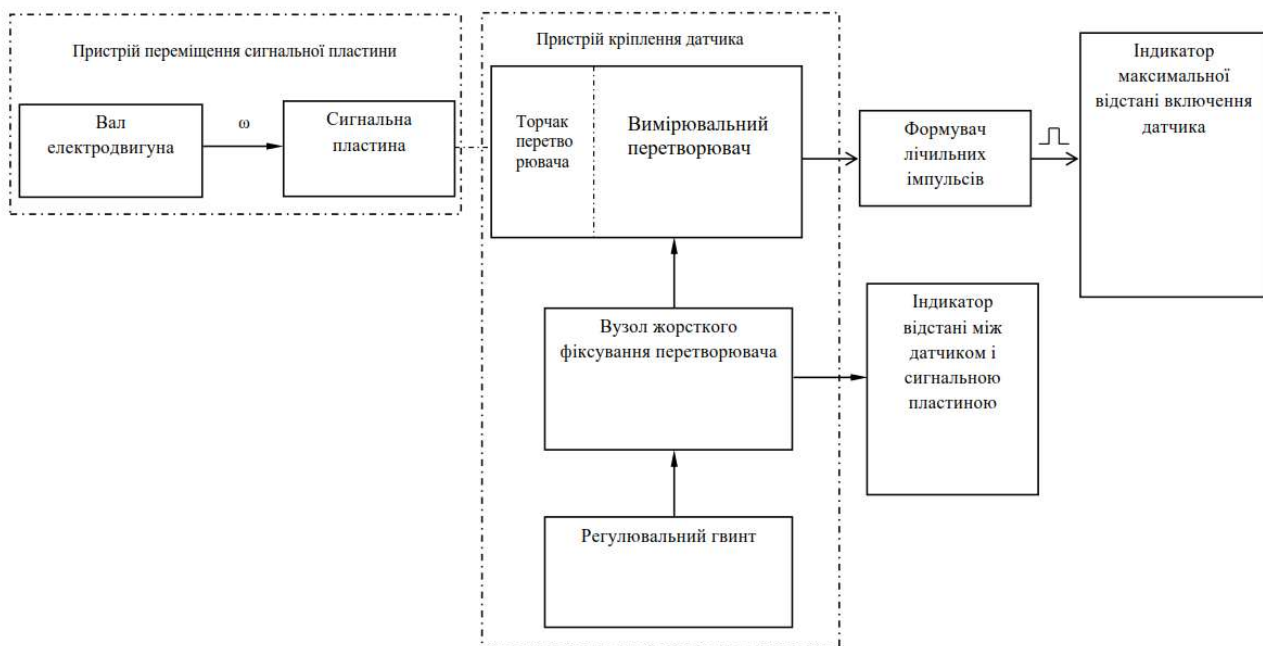


Рис. 4 – Структурна схема експериментальної установки

В якості електродвигуна застосовувався електродвигун постійного струму ДПР-7 з таходатчиком і регулятором швидкості.

В якості індикатора відстані між датчиком і сигнальною пластиною застосовувався багатооборотний механічний індикатор типу 5МІГ.

В якості індикатора максимальної відстані спрацювання датчика використовувався універсальний осцилограф С1-108, призначений для визначення періодичних і одиночних імпульсів.

Момент включення перетворювача визначався по появі імпульсу на екрані осцилографа.

Розміри сигнальної пластини: ширина 10 мм, довжина 15 мм.

Експеримент проводився за складеною план-матрицею.

Виміри проводилися при частоті обертання валу і, отже, сигнальної пластини починаючи з  $\omega = 10$  об / хв. При такій невисокій частоті обертання чутливість вимірювального перетворювача близька до мінімальної. У техніці такі частоти доводиться вимірювати досить рідко. Зазвичай вони становлять тисячі об / хв. З підвищенням частоти, чутливість вимірювального перетворювача буде суттєво зростати.

Результати експерименту із сигнальною пластиною шириною 10 мм і довжиною 15 мм наведені на рис. 5.

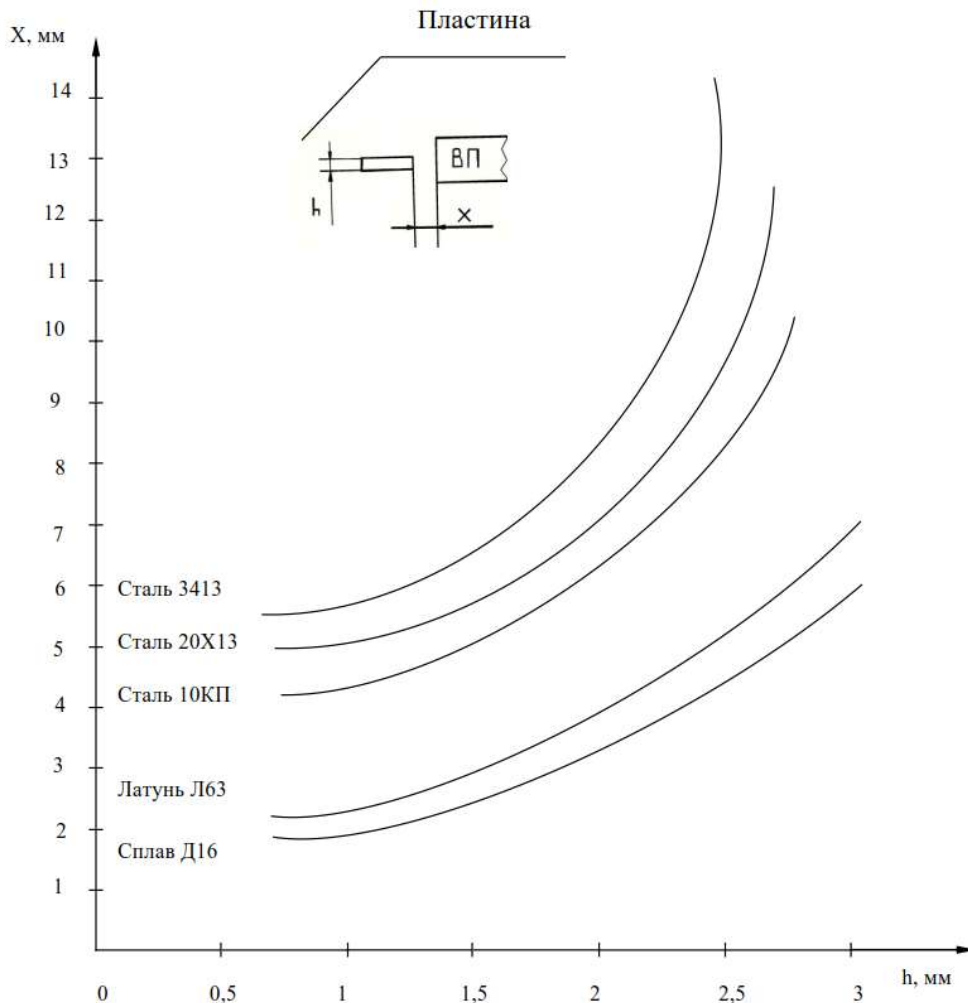


Рис. 5 – Експериментальна залежність максимальної відстані включення датчика від товщини сигнальної пластини для різного матеріалу пластини

З наведених графіків видно, що при застосуванні сигнальних пластин зі сталі, з мінімальною товщиною 0,5 мм, вимірювальний перетворювач надійно спрацьовує на відстані між сигнальною пластинкою і перетворювачем до 4 мм, а з пластинами зі латуні та алюмінію до 2 мм.

У реальних умовах, товщина пластини зазвичай складає не менш 2 ÷ 2,5 мм, що дозволяє збільшити відстань до 8 ÷ 10 мм, при використанні сталевих сигнальних пластин, і до 4 мм, при використанні латунних та алюмінієвих. Також у реальних умовах частота обертання, що вимірюється, зазвичай складає сотні та тисячі об / хв. Слід ще раз підкреслити, що з підвищенням частоти обертання чутливість вимірювального перетворювача буде суттєво зростати і відстань спрацювання буде також зростати.

#### Висновки.

1. Складена план-матриця експерименту забезпечила підвищення точності й достовірності отриманих експериментальних даних за рахунок усунення можливості виникнення систематичної похибки та обраному інтервалу вимірювань.

2. Розроблена і створена установка для проведення досліджень забезпечила проведення експерименту за запропонованою план-матрицею.

3. Отримані експериментальні дані показали високу чутливість датчика, високу надійність його спрацювання у широкому діапазоні відстані між датчиком і сигнальною пластинкою при різних матеріалах сигнальної пластини, чим підтвердили його універсальність, тобто спроможність використання датчика в комп'ютерних системах контролю та діагностики різного призначення

#### Список літератури

1. Диагностика машин автоматом и промышленных роботов. / под ред. В. П. Нахапетова. – М.: 1991. – 175 с.
2. Технические средства диагностики. Справочник: / под ред. В.В. Клоева. – М.: Машиностроение, 1989. – 672 с.
3. Бридли К. Измерительные преобразователи. Справочное пособие. / Пер. с англ. / К. Бридли – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 144 с.
4. Кузьмичев Д.А. Автоматизация экспериментальных исследований. / Д.А. Кузьмичев, И.А. Радкевич, А.Д. Смирнов – М.: Высш.шк., 1987. – 407 с.
5. Володарский Е.Т. и др. Планирование и организация измерительного эксперимента. / Е.Т. Володарский, Б.М. Малиновский, Ю.М. Туз – М.: Высш. Шк., 1987. – 280 с.
6. Джонсон Н. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке: Методы планирования эксперимента. Пер. с англ. / Н. Джонсон, Ф.Лион. – М.: Мир, 1991. – 520 с.

7. Евтихеев Н.Н. Измерения электрических и неэлектрических величин / Н.Н. Евтихеев, Я.А. Купершмидт, В.Ф. Папуловский, В.Н. Скугоров //.– М.: Энергоатомиздат, 1990. – 352 с.
8. Безвесильная А.Н. Таланчук П.Н. Преобразующие устройства приборов / Е. Н. Безвесильная, П. М. Таланчук //.– К.: УМК ВО., 1993. – 552 с.
9. Вострокутов М.М. Цифровые измерительные устройства, теория погрешностей, испытания, поверка / М.М. Вострокутов // – М.: Энергоатомиздат, 1990 – 208 с.
5. Volodarskiy E.T. i dr. Planirovanie i organizatsiya izmeritelnogo eksperimenta. / E.T. Volodarskiy, B.M. Malinovskiy, Yu.M. Tuz – Moscow : Vyssh. Shk ., 1987. – 280 p.
6. Dzhonson N. Statistika i planirovanie eksperimenta v tehnike i nauke: Metodyi planirovaniya eksperimenta. Per. s angl. / N. Dzhonson, F. Lion – Moscow : Mir, 1991.-520 s.
7. Evtiheev N.N. Izmereniya elektricheskikh i neelektricheskikh velichin / N.N. Evtiheev, Ya.A. Kupershmidt, V.F. Papulovskiy, V.N. Skugorov .– Moscow: Energoatomizdat, 1990. – 352 p.
8. Bezvesilnaya A.N. Talanchuk P.N. Preobrazuyuschie ustroystva priborov / E. N. Bezvesilnaya, P. M. Talanchuk.– Kiev .: UMK VO., 1993. – 552 p.
10. Vostrokutov M.M. Tsifrovyye izmeritelnyye ustroystva, teoriya pogreshnostey, ispytaniya, poverka / M.M. Vostrokutov – Moscow .: Energoatomizdat, 1990

#### References (transliterated)

1. Diagnostika mashin avtomatov i promyshlennyih robotov. / pod red .. V. P. Nahapetova. – Moscow : 1991. – 175 p.
2. Tehnicheskie sredstva diagnostiki. Spravochnik: / Pod red .. V.V. Klyueva. – Moscow : Mashinostroenie, 1989. – 672 p.
3. Bridli K. Izmeritelnyye preobrazovateli. Spravochnoe posobie .: per. s angl. – Kiev : Bridli – M .: Energoatomizdat, 1991. – 144 p.
4. Kuzmichev D.A. Avtomatizatsiya eksperimentalnyh issledovaniy. / D.A. Kuzmichev, I.A. Radkevich, A.D. Smirnov – Moscow : Vyssh.shk., 1987. – 407 p.

Надійшла (received) 11.10.2019

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

**Смолін Юрій Олександрович (Смолин Юрий Александрович, Smolin Yuriy Aleksandrovich)** – кандидат технічних наук, доцентдоцент кафедри «Комп'ютерні та радіоелектронні системи контролю та діагностики», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна

## ЗМІСТ

<b>Чухліб В. Л.</b> Розвиток наукової школи обробки металів тиском у Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут».....	3
<b>Аніщенко О. С., Кухар В. В., Присяжний А. Г., Коренко М. Г., Сагіров Ю. Г.</b> Дослідження контуру бокової поверхні при осадці надвисоких заготовок.....	8
<b>Боровік П. В.</b> Задача оптимізації профілювання фасонного ножа.....	15
<b>Драгобецький В. В., Шлик С. В., Наумова О. О., Кузєв І. О., Молоштан Д. В.</b> Математична модель вибуховоударного навантаження зміцнюваних елементів гірничого устаткування.....	20
<b>Кругляк І. В.</b> Study of physical and mechanical properties of diffusion layers obtained using composite saturative environments.....	27
<b>Максименко О. П., Лобойко Д. И., Постольник Л. В.</b> Исследование контактных напряжений при прокатке в режиме гидродинамического трения.....	31
<b>Матюхін А. Ю., Альфьоров І. А., Стефаненко Т. А., Стефаненко О. В.</b> Способи підвищення якості кування поковок високолегованих марок сталей та сплавів на гідропресах.....	36
<b>Ноздрачова К. Л.</b> Роздільно-поєднаний безконтактний ультразвуковий ємнісний перетворювач для контролю імпульсами поверхневих хвиль.....	41
<b>Плеснецов Ю. А.</b> Определение параметров очага деформации при производстве замкнутых сварных гнутых профилей.....	45
<b>Пузырь Р. Г., Левченко Р. В., Сира Ю. Б., Лелюх С. Н.</b> Численное моделирование потери устойчивости трубной заготовки при раздаче соединительных переходников.....	51
<b>Сабол С. Ф., Горностай В. Н., Левченко П. А.</b> Формування фланців в тубчастих заготовках в штампах з активною дією сил тертя.....	57
<b>Салам Буссі, Сучков Г. М., Мигущенко Р. П., Кропачек О. Ю., Плеснецов С. Ю.</b> Современное состояние методов и средств ультразвукового контроля проката с применением электромагнитно-акустических преобразователей.....	63
<b>Сергеев А. С., Дитиненко С. А., Новиков Ф. В.</b> Повышение качества обработки при шлифовании путем уменьшения шероховатости поверхности.....	70
<b>Смолін Ю. О.</b> Універсальний датчик частоти обертання.....	76

## CONTENT

<b>Chukhlib V. L.</b> Development of a scientific school for metalworking at the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute".....	3
<b>Anishchenko O. S., Kukhar V. V., Prysyazhnyi A. H., Korenko M. G., Sahirov Yu. G.</b> Study of the contour of the side surface during the precipitation of ultrahigh billet.....	8
<b>Borovik P. V.</b> The optimization problem of the shaped knife profiling.....	15
<b>Drahobetskyi V., Shlyk S., Naumova O., Kuziev I., Moloshtan D.</b> Mathematical model of explosive loading of strengthened elements of mining equipment.....	20
<b>Kruglyak I. V.</b> Study of physical and mechanical properties of diffusion layers obtained using composite saturative environments.....	27
<b>Maksimenko O. P., Loboiko D. I., Postolnyk L. V.</b> Investigation of contact stresses while rolling in hydrodynamic friction.....	31
<b>Matiukhin A. U., Alfyorov I. A., Stefanenko T. A., Stefanenko O. V.</b> Methods for improving quality forging blank of high-alloyed steels grade and alloys on hydropresses.....	36
<b>Nozdrachova K. L.</b> Duals capacitive non-contacting ultrasonic transducers for impulse control surface waves.....	41
<b>Plesnetsov Yu. A.</b> Determination of parameters of the deflection center for the production of closed welded bended profiles.....	45
<b>Puzyr R., Levchenko R., Siraya Y., Pedun O.</b> Numerical simulation of loss sustainability of pipe processing at the distribution of connecting adapters.....	51
<b>Sabol S.F., Gornostay V. M., Levchenko P. O.</b> Formation of flanges in tube blades in prints with the active action of friction.....	57
<b>Salam Bussi, Suchkov G. M., Miguschenko R. P., Kropachek O. Yu., Plesnetsov S. Yu.</b> Current state of methods and means of ultrasonic control rental with use of electromagnetic-acoustic converters.....	63
<b>Serhieiev O., Ditinenko S., Novikov F.</b> Improvement of quality of processing when grinding by reducing surface roughness.....	70
<b>Smolin Yu.O.</b> Universal RPM sensor.....	76

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

**ВІСНИК НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ «ХПІ».  
СЕРІЯ: ІННОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ОБЛАДНАННЯ ОБРОБКИ МАТЕРІАЛІВ  
У МАШИНОБУДУВАННІ ТА МЕТАЛУРГІЇ**

**Збірник наукових праць**

**№ 12 (1337) 2019**

Наукові редактори: Марченко А.П., д-р техн. наук, професор, НТУ «ХПІ», Україна,  
Плеснецов Ю.О., канд. техн. наук, ст. н. с., НТУ «ХПІ», Україна  
Технічний редактор: Курандо О.С., інженер I категорії, НТУ «ХПІ», Україна

**АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ:** 61002, Харків, вул. Кирпичова, 2, НТУ «ХПІ».  
Кафедра обробки металів тиском  
Тел.: (057) 707-60-40; e-mail: omd.conf@gmail.com

Обл.-вид. № 12-19.

Підп. до друку 10.11.2019 р. Формат 60x84 1/8. Папір офсетний. RISO-друк. Гарнітура Таймс.  
Ум. друк. арк. 9.2. Обл.-вид. арк. 9,1.  
Наклад 100 прим. Зам. № 19. Ціна договірна.

---

Видавничий центр НТУ «ХПІ».  
Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 5478 від 21.08.2017 р..  
61002, Харків, вул. Кирпичова, 2

---

Видавництво та друк ФО-П Єфименко С.А.  
61166, Україна, м. Харків, вул. Коломенська, 27  
Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до Державного реєстру видавців,  
виготовлювачів і розповсюджувачів видавничої продукції  
ДК № 6869 від 08.08.2019 р.