

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**

№ 26 (1351) 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 26 (1351) 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. – № 26 (1351) 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. тех. наук, доц., НТУ «ХПІ», Україна

*Члени редколегії:*

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

#### Editor-in-chief

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

#### Deputy editor-in-chief

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

#### Secretary

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

#### The editorial board of the series:

*Editor:*

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

*Deputy managing editor:*

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

*Secretary:*

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

*Members of the Editorial Board:*

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Рекомендовано до друку Вченою радою НТУ «ХПІ».  
Протокол № 10 від 28 грудня 2019 р.

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», 2019

УДК 681.2.08:53.088; УДК 620.179.14

*І. В. ГРИГОРЕНКО, С. М. ГРИГОРЕНКО, Л. О. ВОВК***ДОСЛІДЖЕННЯ КОНТРОЛЬНО-ВИМІРЮВАЛЬНОГО ОБЛАДНАННЯ  
ЗА ДОПОМОГОЮ СИСТЕМИ FUZZY-LOGIC**

В роботі розглянуто вирішення науково-практичної задачі контролю точності вимірювання параметрів технологічного процесу виготовлення карамелі для підвищення її якості за допомогою створення евристичного аналізатора на базі інтерфейсу користувача системи Fuzzy-Logic.

Проаналізовано фактори, що впливають на точність вимірювання, доведено можливість застосування апарату Fuzzy-Logic для визначення таких параметрів технологічного процесу, які забезпечують максимальну якість продукції. Проведено комп'ютерне моделювання, яке підтвердило, що створення евристичного аналізатора для визначення якості карамелі доцільно та необхідно для того, щоб не допустити виробництво неякісної продукції. На підставі даних, отриманих з результатів натурних вимірювань параметрів технологічного процесу виготовлення карамельного сиропу проведено розрахунки стандартної невизначеності результатів вимірювань по типам А та В, щоб мати можливість своєчасно прогнозувати відмову датчиків на основі зміни форми закону розподілу результатів вимірювань та назначити міжповітряні інтервали для досліджуваного обладнання.

**Ключові слова:** вимірювач, похибка, нечітка логіка, евристичний аналізатор, точність, контроль.

*І. В. ГРИГОРЕНКО, С. Н. ГРИГОРЕНКО, Л. А. ВОВК***ИССЛЕДОВАНИЕ КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ  
ПРИ ПОМОЩИ СИСТЕМЫ FUZZY-LOGIC**

В работе рассмотрено решение научно-практической задачи контроля точности измерения параметров технологического процесса изготовления карамели для повышения ее качества с помощью создания эвристического анализатора на базе интерфейса системы Fuzzy-Logic.

Проанализированы факторы, влияющие на точность измерения, доказана возможность применения аппарата Fuzzy-Logic для определения таких параметров технологического процесса, которые обеспечивают максимальное качество продукции. Проведено компьютерное моделирование, которое подтвердило, что создание эвристического анализатора для определения качества карамели целесообразно и необходимо для того, чтобы не допустить производство некачественной продукции. На основании данных, полученных по результатам натурных измерений параметров технологического процесса изготовления карамельного сиропа проведены расчеты стандартной неопределенности результатов измерений по типам А и В, чтобы иметь возможность своевременно прогнозировать отказ датчиков на основе изменения формы закона распределения результатов измерений и определять межповерочный интервал для исследуемого оборудования.

**Ключевые слова:** измеритель, погрешность, нечеткая логика, эвристический анализатор, точность, контроль.

*I. V. HRIHORENKO, S. N. HRIHORENKO, L.O. VOVK***RESEARCH OF MONITORING AND MEASURING EQUIPMENT  
USING THE FUZZY-LOGIC SYSTEM**

The paper considers the solution of the scientific and practical problem of controlling the accuracy of measuring the parameters of the technological process of making caramel to improve its quality by creating a heuristic analyzer based on the interface of the Fuzzy-Logic system.

The factors affecting the measurement accuracy are analyzed, the possibility of using the Fuzzy-logic apparatus to determine such process parameters that ensure maximum product quality is proved. Computer simulation was carried out, which confirmed that the creation of a heuristic analyzer to determine the quality of caramel is appropriate and necessary in order to prevent the production of low-quality products. Based on the data obtained from the results of field measurements of the parameters of the technological process of making caramel syrup, the standard uncertainty of the measurement results for types A and B was calculated in order to be able to timely predict sensor failures based on the change in the shape of the distribution law of the measurement results and determine the calibration interval for the equipment under study.

**Keywords:** meter, error, fuzzy-logic, heuristic analyzer, accuracy, control.

**Вступ.** На сучасному етапі розвитку промисловості продукцію високої якості можна випустити тільки при дотриманні всіх технологічних режимів виробництва та оперативному виправленні всіх можливих відхилень. Для такого оперативного виправлення можливих відхилень від оптимального технологічного режиму потрібна постійна оперативна інформація про хід технологічного процесу. Таку інформацію дає служба технохімічного контролю на основі проведених систематичних аналізів і показань контрольно-вимірювальних приладів [1].

Взагалі технологічний контроль (ТК) є основою для всіх стадій виробництва у промисловості: починають його від надходження сировини та закінчують виходом готової продукції. Якість сировини та матеріалів контролюють не тільки в момент надходження, але з періодичністю при тривалому зберіганні на складах. Велике значення ТК має за точністю дозування окремих видів сировини та

напівфабрикатів відповідно до рецептурних норм. Навіть незначні систематичні відхилення в дозуванні можуть значно вплинути на якість продукції, а також на економічні показники роботи підприємства в цілому. Своєчасний ТК параметрів технологічного процесу (ТП) на кожному етапі виробництва дозволить підвищити якість продукції – карамелі, оскільки ретельне дотримання режимів обробки сировини та напівфабрикатів можливе лише при використанні високоточних вимірювальних перетворювачів, що працюють у комплексі з сучасними обчислювальними системами (ОС) [1, 2].

**Аналіз літературних джерел інформації та постановка проблеми.** Предметом нечіткої логіки вважається дослідження суджень в умовах нечіткості, які схожі з судженнями в звичайному сенсі, а також їх застосування в обчислювальних системах [3–6]. В

даний час існує безліч алгоритмів нечіткої логіки. Найчастіше використовуються такі з них: алгоритми Mamdani Tsukamoto Sugeno Larsen. В роботі [7] здійснений вибір моделей для лінгвістичних змінних в нечіткому логічному висновку Mamdani і доведено його перевага перед іншими методами при оцінці якості. Подальший літературний аналіз показує підвищений інтерес до використання математичного апарату нечіткої логіки в промисловості і соціально-економічній сфері. В роботі [8] представлена нова методологія ідентифікації систем для промислових систем. Ефективність запропонованого підходу демонструється на експериментальних трасах від компресора в промислової газотурбінної системі. Так в роботі [9] представлено рішення задачі класифікації дефектів металевих труб нафто- і газопроводів за допомогою алгоритму нечіткого логічного висновку Mamdani і нечіткої бази знань Sugeno. В роботі [10] запропонований метод підвищення точності виявлення дефектів металевих виробів, доведена можливість застосування апарату теорії нечітких множин для визначення таких параметрів перетворювача, які нададуть можливість мінімізувати похибку при визначенні дефекту. В роботі [11] розглянуто рішення задачі контролю точності параметрів технологічного процесу виготовлення кефіру і підвищення його якості за допомогою створення евристичного аналізатора. В роботі [12] розглянуті приклади застосування апарату fuzzy-logic в сфері бізнесу, медичної діагностики, в різних системах управління.

У даній роботі ставиться за мету розглянути практичну реалізацію використання апарату Fuzzy-Logic в питаннях контролю якості карамельного сиропу шляхом моделювання евристичного аналізатора за допомогою інтерфейсу Fuzzy Logic Toolbox в програмному середовищі MATLAB.

**Основний текст.** У роботі [1] запропоновано структурну схему вимірювача основних параметрів технологічного процесу виготовлення карамелі. На

рис. 1 представлено структурну схему такої системи контролю. Наведена система має вісім каналів вимірювання: шість каналів вимірювання температури, яка діє не первинні вимірювальні перетворювачі (ПВП) ПВП1, ПВП4 – ПВП8; датчик вологості сировини ПВП2; датчик тиску пару ПВП3. Як видно із структурної схеми – датчики розташовані на відповідних ділянках технологічного процесу, а саме: датчики контролю температури ПВП1, вологості сировини ПВП2 та датчик тиску пару ПВП3 необхідні при контролі виготовлення карамельного сиропу; ПВП4 здійснює контроль температури при уварюванні сиропу; ПВП5 – контролює температуру при охолодженні рідкої карамельної маси; ПВП6 – контролює температуру охолодження при витягуванні карамельної маси; ПВП7 – контролює температуру у середині формувальної машини; ПВП8 – контролює температуру охолодження на охолоджувальних пристроях.

До структурної схеми входять такі блоки: мікроконтролер (МК) необхідний для обробки вимірювальної інформації, керування даною інформацією, забезпечення обміну даними між окремими частинами схеми та зовнішніми пристроями, відображає інформацію на рідкокристалічному індикаторі та передає до персонального комп'ютера (ПЕОМ) по інтерфейсу; генератор синхронізуючих імпульсів (ГСІ) виробляє синхроімпульси, необхідні для роботи мікроконтролера; пульт управління (ПУ) виконує початкове налаштування мікроконтролера, та забезпечує його скидання; інтерфейс (ІФ) призначений для обміну даними із зовнішніми пристроями, зокрема з ПЕОМ; цифровий відліковий пристрій (ЦВП) необхідний для цифрового відображення інформації на екрані; блок живлення (БЖ) забезпечує необхідну напругу для роботи приладу.

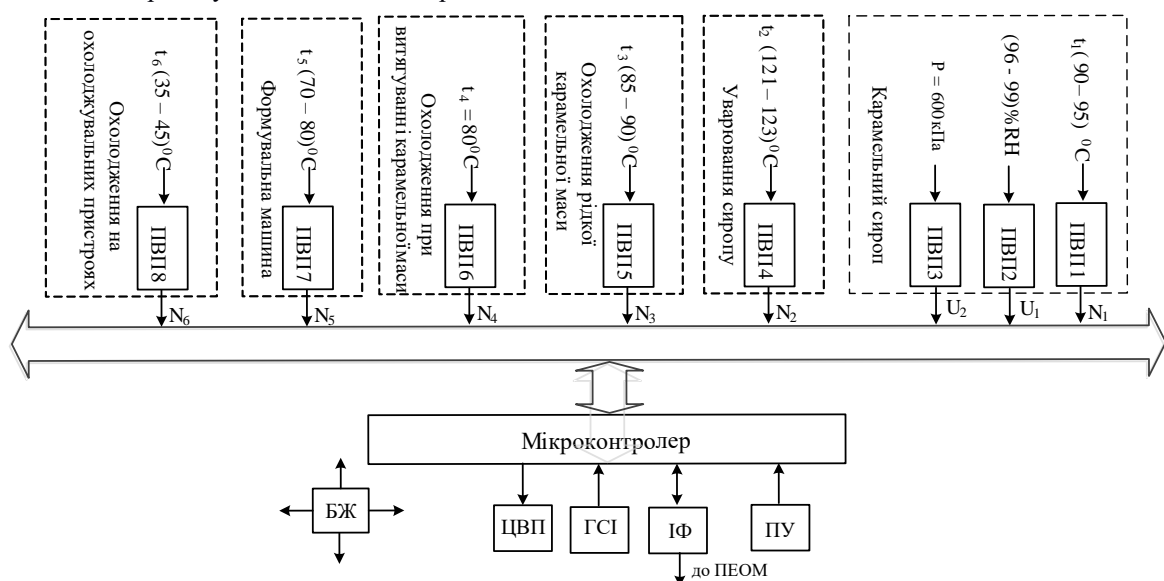


Рис. 1 – Структурна схема вимірювача параметрів технологічного процесу виготовлення карамелі

Для приведення приладу у робочий стан необхідно підключити його до джерела енергії. Далі відбувається початкове налаштування мікроконтролера. Після настройки МК іде вибір вимірювального каналу й очікування готовності даних з ПВП, після чого виконується зчитування мікроконтролером інформації з первинних вимірювальних перетворювачів. Інформація результатів виміру надходить в ОЗП. Далі мікроконтролер обробляє надану інформацію та передає результат виміру в ПЕОМ або відображає на цифровому відліковому пристрої. Якщо потрібно зробити новий вимір, вертаємося до вибору вимірювального каналу. Цикл повторюється знову. Якщо необхідно припинити роботу приладу, то вимикається живлення.

Для побудови евристичного аналізатора буде використано інтерфейс користувача системи fuzzy-

logic, який є додатком програми MatLab. У ньому обираємо алгоритм нечіткого виводу Мамдані (Mamdani), як найбільш придатний для поставленої задачі у порівнянні з алгоритмом Сугено (Michio Sugeno). Для побудови системи з нечіткою логікою (TipExpert) обираємо найбільш критичний для отримання якісної продукції етап технологічного процесу виготовлення карамелі – виготовлення карамельного сиропу. На цьому етапі повинно контролювати три основні параметри, а саме температуру, тиск та вологість. Отже у моделі повинні бути три входи і один вихід – якість карамельного сиропу. У якості першого входу обираємо параметр – температуру (temperature). У якості другого входу – тиск (pressure). Третій вхід – вологість речовини (%RH). У якості вихідної величини обираємо якість карамельного сиропу – (quality) (рис.2).

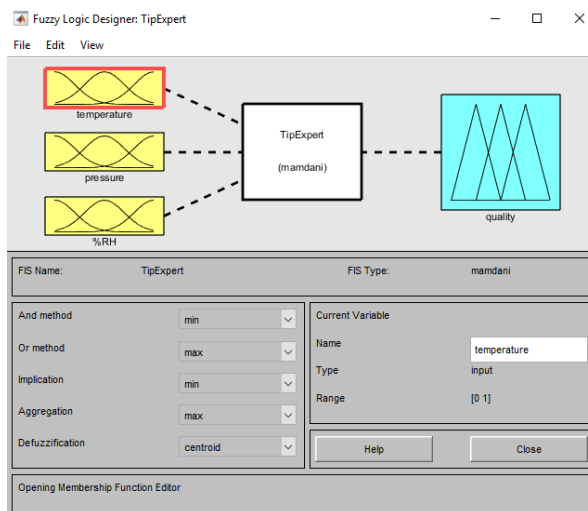


Рис. 2 – Вікно завдання вхідних та вихідних параметрів

Задаємо функції належності для обраної вхідної змінної – температури. У пункті Range встановимо діапазон у якому змінюється функція (від 90 до 95° C). Задаємо тип функції належності у графі Type: для трьох функцій належності, а саме мінімальної (min), середньої (average) та максимальної (max) обираємо розподіл Гауса

Задаємо функції належності для обраної вхідної змінної – тиску. У пункті Range встановимо діапазон у якому змінюється функція (від 597 до 600 кПа). Задаємо тип функції належності у графі Type: для трьох функцій належності, а саме мінімальної (min), середньої (average) та максимальної (max) обираємо розподіл Гауса.

Задаємо функції належності для обраної вхідної змінної – вологість речовини. У пункті Range встановимо діапазон у якому змінюється функція (від 96 до 99 %RH). Задаємо тип функції належності у графі Type: для трьох функцій належності, а саме мінімальної (min), середньої (average) та максимальної (max) обираємо розподіл Гауса.

Задаємо функції належності для обраної вихідної змінної – якість. У пункті Range встановимо діапазон

у якому змінюється функція (від 0 до 5). Задаємо тип функції належності у графі Type: для трьох функцій належності, а саме погано (bad), задовільно (average) та гарно (good) обираємо розподіл (trimf) – трикутний закон розподілу.

Задаємо правила, за якими буде діяти модель.

Правила складаються за моделлю:

$$p_1 : \text{ЯКЩО } [x \in A_1] \text{ ТА } [y \in B_1] \text{ ТО } [z \in C_1],$$

$$p_2 : \text{ЯКЩО } [x \in A_2] \text{ ТА } [y \in B_2] \text{ ТО } [z \in C_2],$$

$$p_3 : \text{ЯКЩО } [x \in A_3] \text{ ТА } [y \in B_3] \text{ ТО } [z \in C_3]$$

де  $x, y, z \dots$  – іменні вхідних (вихідних) лінгвістичних змінних,  $A_1, A_2, A_3, B_1, B_2, B_3, C_1, C_2, C_3$  – деякі нечіткі множини, описувані своїми функціями належності.

Якість характеризується такими параметрами як температура, тиск та вологість.

У вікні «правила» складемо правила, які характеризують якість.

Оскільки система має три входи, тому максимум вихідних станів  $3 \cdot 3 \cdot 3 = 27$  різних вихідних комбінацій.

Для отримання результату можливо скоротити кількість правил до дванадцяти.

Деякі з них:

1. Якщо температура «min», та тиск «min», та вологість «min», то якість «bad».

2. Якщо температура «min», та тиск «min», а вологість сировини «average», то якість також «bad».

3. Якщо температура «min», та тиск «min», та кислотність «max», то якість також «bad» (рис. 3).

Поверхні відгуку при трьох можливих сполученнях параметрів, що впливають на якість, зображені на рис. 4 (а, б, в).

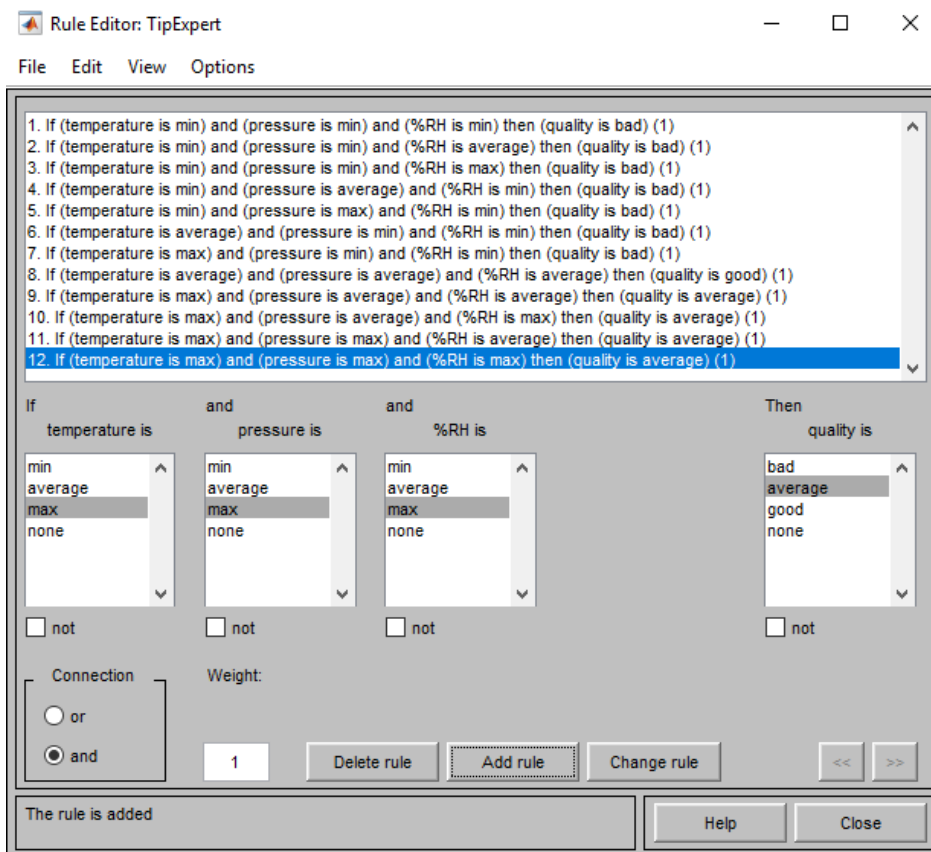
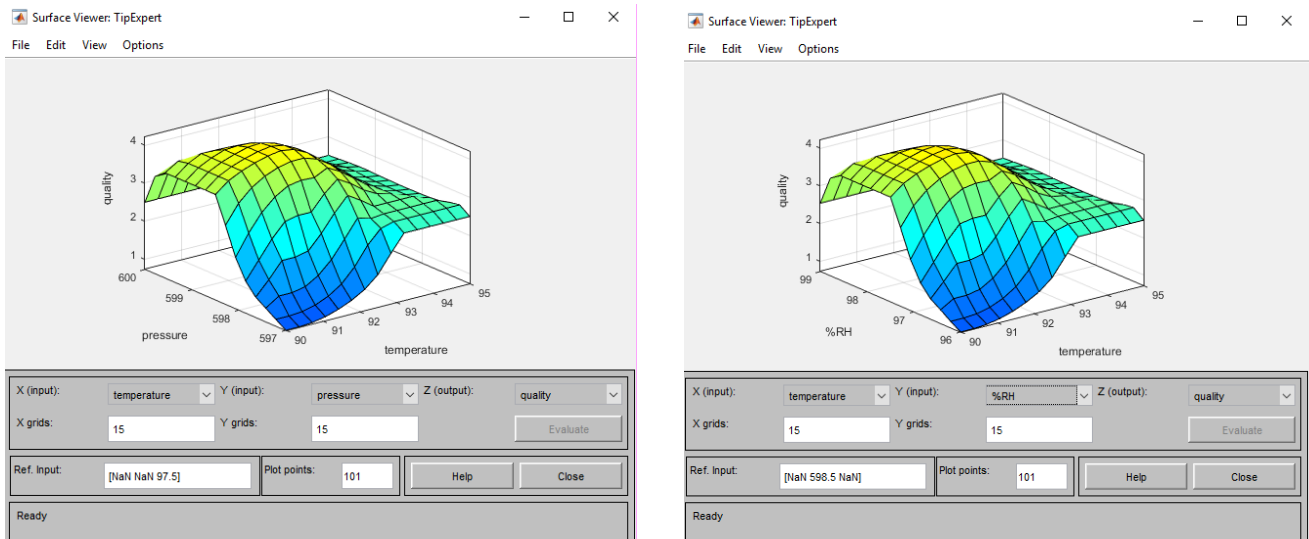


Рис. 3 – Вікно редактора правил

Отже, за допомогою графічного інтерфейсу користувача вдалося побудувати систему з нечіткою логікою, яка надала можливість встановити який саме вплив на якість карамельного сиропу оказують температура, тиск, та вологість речовини. З рис 4 видно, що якісно поверхні відгуків при визначенні взаємного впливу температури у об'єднанні з тиском та вологістю співпадають. Такий результат говорить про їх рівнозначний вплив на якість карамельного сиропу. Встановлено, що підтримка параметрів

технологічного процесу у середині робочого діапазону дає можливість отримати найвищу якість готової продукції. Оптимальна якість буде коли температура дорівнює 92,5 °C, % RH – 97,5 %, тиск – 599 кПа.

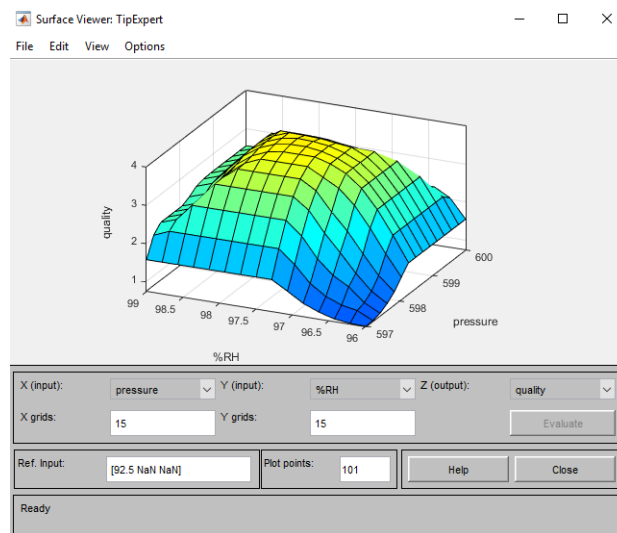
Було проведено обробку результатів прямих багаторазових вимірювань з датчиків контролю температури, тиску пару, вологості речовин та підтвержено гіпотезу про нормальність закону розподілу результатів вимірювань.



а

б

в



в

Рис. 4 – Поверхні відгуку: а – значень змінних температури та тиску, б – змінних температури та вологості речовини, в – значень змінних тиску та вологості речовини

На рис. 5 представлено результати спостережень за зміною температури (рис. 5а), за зміною тиску пару (рис. 5в), та за зміною вологості речовин (рис.5в).

Стандартна невизначеність вимірювань типу А вхідної величини  $X_i$  розраховується за формулою

$$u_A(\bar{x}_i) = \sqrt{\frac{\sum_{q=1}^{n_i} (x_{iq} - \bar{x}_i)^2}{n_i(n_i - 1)}}, \quad (1)$$

де  $n_i$  – кількість спостережень проведених при вимірюванні  $X_i$ .

Стандартна невизначеність вимірювань типу А вхідних величин – температури, тиску пару, вологості сировини розраховується за формулою (1)

$$u_A(\bar{t}_i) = 0,114 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

$$u_A(\bar{p}_i) = 0,366 \text{ кПа}.$$

$$u_A(\bar{RH}_i) = 0,159 \text{ } \%$$

Для результатів вимірювання, що описуються нормальним розподілом, стандартна невизначеність типу В оцінюється за формулою

$$u_B(x) = \frac{b-a}{6} \quad (2)$$

Температура сировини вимірюється у діапазоні від  $90^\circ\text{C}$  до  $95^\circ\text{C}$ , отже стандартна невизначеність (тип В) згідно формулі (2) дорівнює

$$u_B(t) = \frac{95-90}{6} = 0,833 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Тиск пари змінюється у діапазоні від 597 кПа до 600 кПа, отже стандартна невизначеність (тип В) згідно формулі (2) дорівнює

$$u_B(P) = \frac{600 - 597}{6} = 0,5 \text{ кПа.}$$

Вологість сировини змінюється у діапазоні від 96 % до 99 %, отже стандартна невизначеність (тип В) згідно формулі (2) дорівнює

$$u_B(RH) = \frac{99 - 96}{6} = 0,5 \text{ \%}.$$

На підставі даних, отриманих з результатів натурних вимірювань параметрів технологічного процесу виготовлення карамельного сиропу вдалося провести розрахунки стандартних невизначеності по типам А та В.

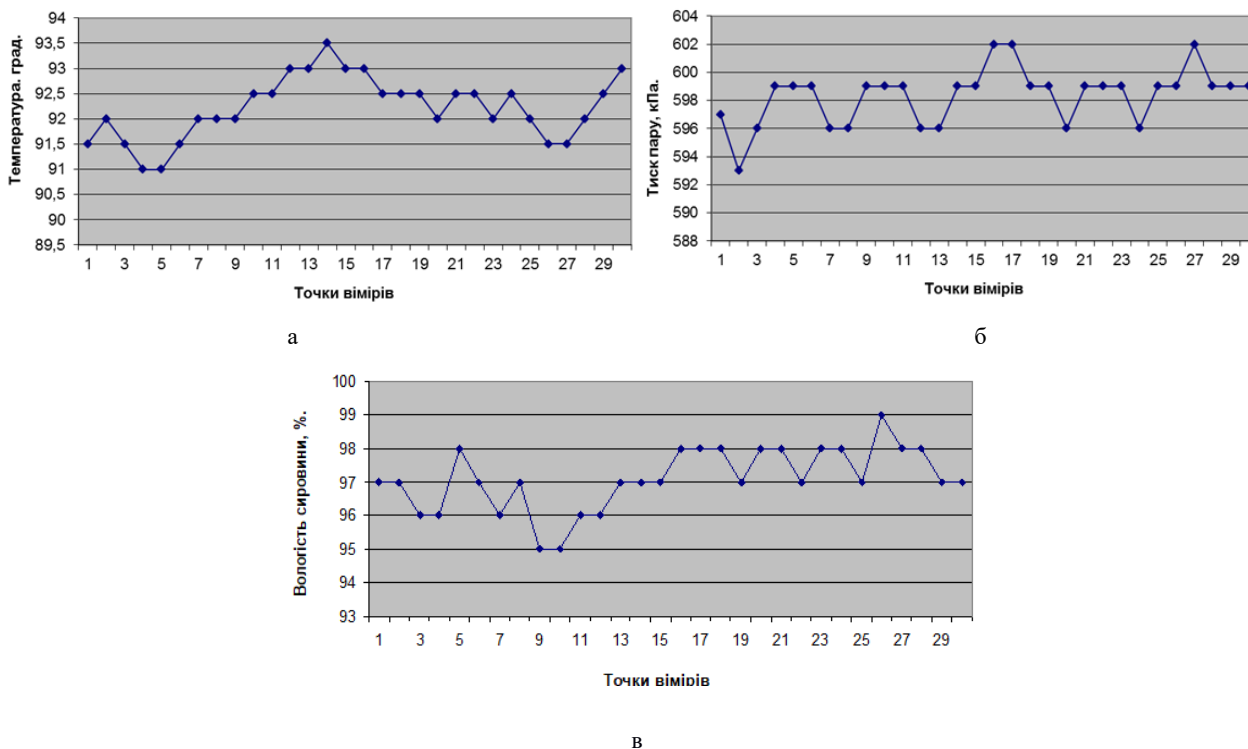


Рис. 5 – Спостереження за зміною: а – температури, б – тиску, в – вологістю речовин

**Висновок.** Запропонований у даній роботі підхід, заснований на нечіткій логіці, дозволяє врахувати параметри, що впливають на технологічний процес для визначення оптимальних співвідношень між ними. Стає можливим вирішити задачу контролю якості продукції саме завдяки апарату fuzzy-logic. Використання графічного інтерфейсу користувача побудованої системи з нечіткою логікою дозволяє встановити якими мають бути вхідні параметри для того, щоб забезпечити високу якість на виході.

Запропонований евристичний аналізатор виконує роль порадики для інженера-технолога і може бути використаний у будь-якій сфері народного господарства.

На підставі даних, отриманих з результатів натурних вимірювань параметрів технологічного процесу виготовлення карамельного сиропу та даних, що отримані за допомогою системи з нечіткою логікою вдалося провести розрахунки стандартних невизначеності по типам А та В. Отримані значення невизначеності цілком задовольняють умовам технічного завдання.

#### Список літератури

1. Григоренко І. В. Вимірювач основних параметрів технологічного процесу виготовлення карамелі / І. В. Григоренко, Л. О. Вовк // II Міжнародна науково-технічна конференція: Актуальні проблеми автоматизації та приладобудування України. – Харків, 2018. – С. 165–166.
2. Григоренко І. В. Розробка цифрового вимірювача параметрів технологічного процесу виготовлення карамелі / І. В. Григоренко, Л. О. Вовк // XXVI Міжнар. наук. – практ. конф.: Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я, том 2. – Харків, 2018. – С. 14.
3. Zadeh L. A. Fuzzy sets. Information and Control, 1965, vol. 8 (3), PP. 338–353. doi: 10.2307/2272014.
4. Zadeh L. A. Fuzzy logic = computing with words. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 1996, vol. 4, Issue 2, PP.103–111, doi: 10.1109/91.493904.
5. Zadeh L. A. Similarity relations and fuzzy orderings. Information sciences, 1971, vol. 3, PP. 177–200. doi: 10.1016/S0020-0255(71)80005-1.
6. Hrihorenko I. Application of user interface Fuzzy Logic Toolbox for quality control of products and services / I. Hrihorenko, T. Drozdova, S. Hrihorenko, E. Tverytnykova // Advanced information system, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Vol. 3, No 4 – P. 118–125.
7. Wu H., Mendel J. M. On Choosing Models for Linguistic Connector Words for Mamdani Fuzzy Logic Systems. IEEE Trans. on Fuzzy Systems, 2004, vol. 12, PP. 29–44. doi: 10.1109/TFUZZ.2003.822675.



8. Yu Zhang, Jun Chen, Chris Bingham, Mahdi Mahfouf, A new adaptive Mamdani-type fuzzy modeling strategy for industrial gas turbines. IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE), 6–11 July 2014, Milan, Italy. doi:10.1109/FUZZ-IEEE.2014.6891815.
9. Григоренко І. В. Дослідження можливостей використання апарату fuzzy-logic при класифікації дефектів металевих труб / І. В. Григоренко, С. М. Григоренко, С. Ю. Гавриленко // Національний науковий центр «Інститут метрології» Український метрологічний журнал – № 2, Харків – 2017.– С. 42–49. doi: 10.24027/2306-7039.2.2017.109757.
10. Григоренко І. В. Дослідження впливу зовнішніх та внутрішніх факторів на похибку виявлення дефектів металевих виробів завдяки апарату fuzzy-logic / І. В. Григоренко, С. М. Григоренко // Національний університет радіоелектроніки. Метрологія та прилади № 3 (65), Харків – 2017.– С. 44–48.
11. Григоренко І. В. Використання нечіткої логіки для контролю точності та підвищення якості продукції / І. В. Григоренко, С. М. Григоренко, С. А. Безбородий // Національний університет радіоелектроніки. Метрологія та прилади № 3 (71), Харків – 2018. – С. 52–57.
12. Asai K., Vatada D., Ivai S. Prikladnye nechetkie sistemy: M.: Mir, 1993. 368 p.
4. Zadeh L.A. Fuzzy logic = computing with words. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 1996, vol. 4, Issue 2, pp.103–111, doi: 10.1109/91.493904.
5. Zadeh L.A. Similarity relations and fuzzy orderings. Information sciences, 1971, vol. 3, pp. 177–200. doi: 10.1016/S0020-0255(71)80005-1.
6. Hrihorenko I. Application of user interface Fuzzy Logic Toolbox for quality control of products and services / I. Hrihorenko, T. Drozdova, S. Hrihorenko, E. Tverytnykova // Advanced information system, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Vol. 3, No 4 – P. 118–125.
7. Wu H., Mendel J.M. On Choosing Models for Linguistic Connector Words for Mamdani Fuzzy Logic Systems. IEEE Trans. on Fuzzy Systems, 2004, Vol. 12, PP. 29–44. doi: 10.1109/TFUZZ.2003.822675.
8. Yu Zhang, Jun Chen, Chris Bingham, Mahdi Mahfouf, A new adaptive Mamdani-type fuzzy modeling strategy for industrial gas turbines. IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE), 6–11 July 2014, Milan, Italy. doi:10.1109/FUZZ-IEEE.2014.6891815.
9. Hrihorenko I.V., Hrihorenko S.M., Havrilenko S.Y. Investigation of the possibilities of using the fuzzy-logic apparatus in measuring and classifying defects in metal tubes. Ukrainian etrological Journal, 2017, Vol. 2. PP. 42–49. doi: 10.24027/2306-7039.2.2017.109757.
10. Hrihorenko I.V., Hrihorenko S.M. Doslidzhennya vplivu zovnishnih ta vnutrishnih faktoriv na pohibku viyavleniya defektiv metalievih виробів завдяки апарату fuzzy-logic. – Natsionalniy universitet radioelektroniki. – Metrologiya ta priladi, 2017, Vol. 3 (65), PP. 44–48. (in Ukrainian).
11. Hrihorenko I.V., Hrihorenko S.M., Bezborodyj Y.A. Vykorystannya nechitkoyi logiky dlya kontrolyu tochnosti ta pidvyshhennya yakosti produkciyi // Natsionalniy universitet radioelektroniki. – Metrologiya ta priladi, 2018, Vol. 3 (71), PP. 52–57. (in Ukrainian).
12. Asai K., Vatada D., Ivai S. Prikladnye nechetkie sistemy: Moscow: Mir, 1993. – 368 p.

#### References (transliterated)

1. Hrihorenko I.V. Vimiryuvach osnovnikh parametriv tekhnologichnogo procesu vigitovlennya karameli / I.V. Hrihorenko, L.O. Vovk // ГГ Mizhnarodna naukovo-tekhni`chna konferenciya: Aktualni problemi avtomatiki ta priladobuduvannya Ukraini. – Kharkiv, 2018. – P. 165–166.
2. Hrihorenko I.V. Rozrobka czifrovogo vimiryuvacha parametriv tekhnologichnogo procesu vigitovlennya karameli / I.V. Hrihorenko, L.O. Vovk // KhKhVI Mizhnar. nauk. – prakt. konf.: Informacijni tekhnologiyi: nauka, tekhnika, tekhnologiya, osvita, zdorovya, vol. 2. – Kharkiv, 2018. – P 14.
3. Zadeh L. A. Fuzzy sets. Information and Control, 1965, vol. 8 (3), pp. 338–353. doi: 10.2307/2272014.

Надійшла (received) 30.11.2019

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

**Григоренко Ігор Володимирович (Григоренко Игорь Владимирович, Hrihorenko Igor Vladimirovich)** – кандидат технічних наук, доцент; Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; професор кафедри інформаційно-вимірвальних технологій і систем; м. Харків, Україна; e-mail: grigmaestro@gmail.com.

**Григоренко Світлана Миколаївна (Григоренко Светлана Николаевна, Hrihorenko Svitlana Mukolayivna)** – кандидат технічних наук, доцент; Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; доцент кафедри комп'ютерних та радіоелектронних систем контролю та діагностики; м. Харків, Україна; e-mail: sngloba@gmail.com.

**Вовк Людмила Олександрівна (Вовк Людмила Александровна, Vovk Lyudmila Oleksandrivna)** – магістрант; Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут».

*В. Л. КАЛЮЖНИЙ, К. Л. МАРЧУК*

### НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН МЕТАЛУ ПРИ ХОЛОДНОМУ ВИДАВЛЮВАННІ КОРОБЧАТИХ ВИРОБІВ З ПЛАСТИЧНОГО АЛЮМІНІЮ

Методом скінченних елементів створена математична модель та проведений аналіз холодного зворотного видавлювання коробчастого виробу з порожниною 12x12 мм із квадратної заготовки розмірами 20x20x20 мм із пластичного алюмінію Al-2024. Використана пластична зі зміцненням модель металу з врахуванням тертя по Кулону. Встановлені залежність зусилля видавлювання від переміщення пуансона, робота деформації, розподіли питомих зусиль на пуансоні, матриці і виштовхувачі. Виявлений тепловий ефект при холодному формоутворенні та визначена температура здеформованого металу. Встановлений напружено-деформований стан, приведені розподіли компонент напружень і деформацій у здеформованій заготовці. Показані кінцеві форма і розміри виробу. Проведено прогнозування механічних властивостей здеформованого металу у стінках і донній частині виробу. На основі розрахункових даних розроблена конструкція штампу для видавлювання коробчастого виробу на гідравлічному пресі.

**Ключові слова:** холодне видавлювання, метод скінчених елементів, коробчастий виріб, зусилля видавлювання, напруження, деформації.

*В. Л. КАЛЮЖНИЙ, К. Л. МАРЧУК*

### НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ МЕТАЛЛА ПРИ ХОЛОДНОМ ВЫДАВЛИВАНИИ КОРОБЧАТЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПЛАСТИЧЕСКОГО АЛЮМИНИЯ

Методом конечных элементов создана математическая модель и проведен анализ холодного обратного выдавливания коробчатого изделия с полостью 12x12 мм с квадратной заготовки размерами 20x20x20 мм из пластичного алюминия Al-2024. Использована пластическая с укреплением модель металла с учетом трения по Кулону. Установлены зависимость усилия выдавливания от перемещения пуансона, работа деформации, распределения удельных усилий на пуансоне, матрицы и выталкиватели. Обнаружен тепловой эффект при холодном формообразовании и определена температура деформированного металла. Установлено напряженно-деформированное состояние, приведены распределения компонент напряжений и деформаций в деформированный заготовке. Показаны конечные форма и размеры изделия. Проведено прогнозирование механических свойств деформированного металла в стенках и донной части изделия. На основе расчетных данных разработана конструкция штампа для выдавливания коробчатого изделия на гидравлическом прессе.

**Ключевые слова:** холодное выдавливание, метод конечных элементов, коробчатое изделие, усилие выдавливания, напряжения, деформации.

*V. L. KALIUZHNYI, K. L. MARCHUK*

### STRESS-DEFORMED STEEL OF METAL IN COLD WOODWORKING OF CORBORATED ARTICLES OF PLASTIC ALUMINUM

A mathematical model was created by the finite element method and the analysis of cold back extrusion of a boxed product with a cavity of 12x12 mm from a square billet of dimensions 20x20x20 mm made of ductile aluminum Al-2024 was carried out. A plastic model with reinforcement was used taking into account the Coulomb friction. The dependence of the extrusion force on the movement of the punch, the work of deformation, the distribution of specific forces on the punch, the matrix and the ejectors are established. A thermal effect was detected during cold forming and a certain temperature of the deformed metal. The stress-strain state is established, the distribution of stress and strain components in the deformed workpiece is given. The final shape and dimensions of the product are shown. The prediction of the mechanical properties of the deformed metal in the walls and bottom of the product is carried out. Based on the calculated data, a die design was developed for extruding a box-like product on a hydraulic press.

**Key words:** cold extrusion, finite element method, box product, extrusion force, stress, deformation.

**Вступ.** Квадратні і прямокутні коробки достатньо розповсюджені деталі, які виготовляють холодним зворотним видавлюванням із пластичних сталей і кольорових металів. При проектуванні технології видавлювання коробок мають місце обмеження на мінімальну товщину стінки і дна, а також на максимальну глибину вдавливания пуансона в заготовку [1, 2]. Як показали експериментальні дослідження і виробничий досвід при холодному видавлюванні коробчастих виробів має місце суттєва нерівномірність деформацій, яка приводить до утворення виступів на торцях стінок. Тому потрібна додаткова операція підрізання торців стінок. В літературних джерелах по проектуванню технології видавлювання коробок мають місце дані по визначенню зусилля видавлювання [3, 4]. Практично відсутні відомості по встановленню кінцевих форм і розмірів коробчастих виробів, зміцнення здеформованого металу. Для розроблення технології холодного видавлювання коробчастих виробів потрібне доопрацювання технологічних і

конструктивних параметрів трудомісткими з великою вартістю експериментальними роботами. Використання математичних моделей на основі методу скінченних елементів (МСЕ) вказаних процесів дозволяє визначити силові режими видавлювання, розподіли питомих зусиль на деформуючому інструменті і встановити кінцеву форму і розміри виробів [5]. Однак мало даних по напружено-деформованому стану металу і практично відсутні відомості по тепловому ефекту при холодному формоутворенні коробок.

**Мета роботи.** Метою даної роботи є створення скінченно-елементних моделей холодного видавлювання квадратних коробчастих виробів та проведення розрахункового аналізу із встановленням параметрів для проектування технології.

**Виклад основного матеріалу.** При розрахунковому аналізі враховані наступні конструктивні параметри – геометрична форма

пуансона, матриці, виштовхувача, а також ряд технологічних – форма заготовки, ступінь деформації, тертя на контактуючих поверхнях по Кулону із коефіцієнтом тертя  $\mu=0,08$ , швидкість деформування. Метал вважався пластичним зі зміцненням, а деформуючий інструмент – абсолютно жорстким.

Схема зворотного видавлювання коробчастих виробів і форма торця пуансона приведені на рис. 1. На рис. 1а зображена в двох проекціях схема видавлювання. Ліворуч від вісі симетрії показане положення перед видавлюванням, праворуч – в кінці

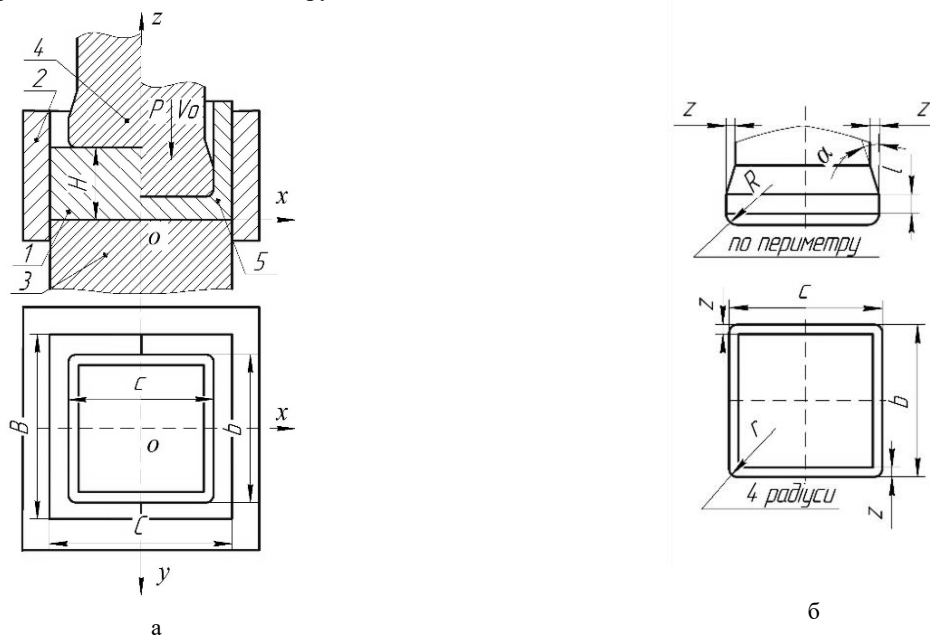


Рис. 1 – Схема видавлювання: а – проекції схеми видавлювання; б - форма робочого торця пуансона

Розрахункові схеми в розрізі, які створені в скінченно-елементному середовищі DEFORM, показані на рис. 2. На рис. 2а приведена схема на

початку видавлювання. Заготовка 1 розміщена в матриці 2 на виштовхувачі 3. При опусканні пуансона 4 утворюється виріб 5 (рис. 2б).



Рис. 2 – Розрахункові схеми: а - на початку видавлювання та б – в кінці видавлювання

**Обговорення результатів.** Силовий режим видавлювання та розподіли питомих зусиль на деформуючому інструменті показані на рис. 3. На рис. 3а приведена залежність зусилля видавлювання від переміщення пуансона. На початку видавлювання

зусилля інтенсивно зростає, а потім при переміщенні пуансона 7 мм і величині  $P = 168$  кН процес переходить в усталену стадію, на якій зусилля практично не змінюється. Розподіли питомих зусиль на деформуючому інструменті можна оцінити по

величинах нормальних напружень  $\sigma_n$  на контактуючих поверхнях між заготовкою і інструментом. На рис. 3а показаний розподіл таких напружень на поверхні пуансона в перерізі по площині  $xoz$  (див. рис. 1а). На вісі пуансона отримано  $\sigma_n=1030$  МПа, на довжині 4 мм –  $\sigma_n=1300$  МПа, а на торці –  $\sigma_n=350$  МПа (див. рис. 1б). Розподіл нормальних напружень по висоті поверхні матриці зображений на рис. 3в. Найбільша величина  $\sigma_n=690$  МПа виникає на матриці у місці

контакту донної частини заготовки з матрицею. При таких питомих зусиллях матриця повинна бути однобандажованою – складатися із внутрішньої втулки і бандажа. На рис. 3г наведений розподіл напружень  $\sigma_n$  на поверхні виштовхувача. В перетині вісей отримано  $\sigma_n=790$  МПа з подальшим зменшенням до  $\sigma_n=480$  МПа при наближенні до торця виштовхувача.

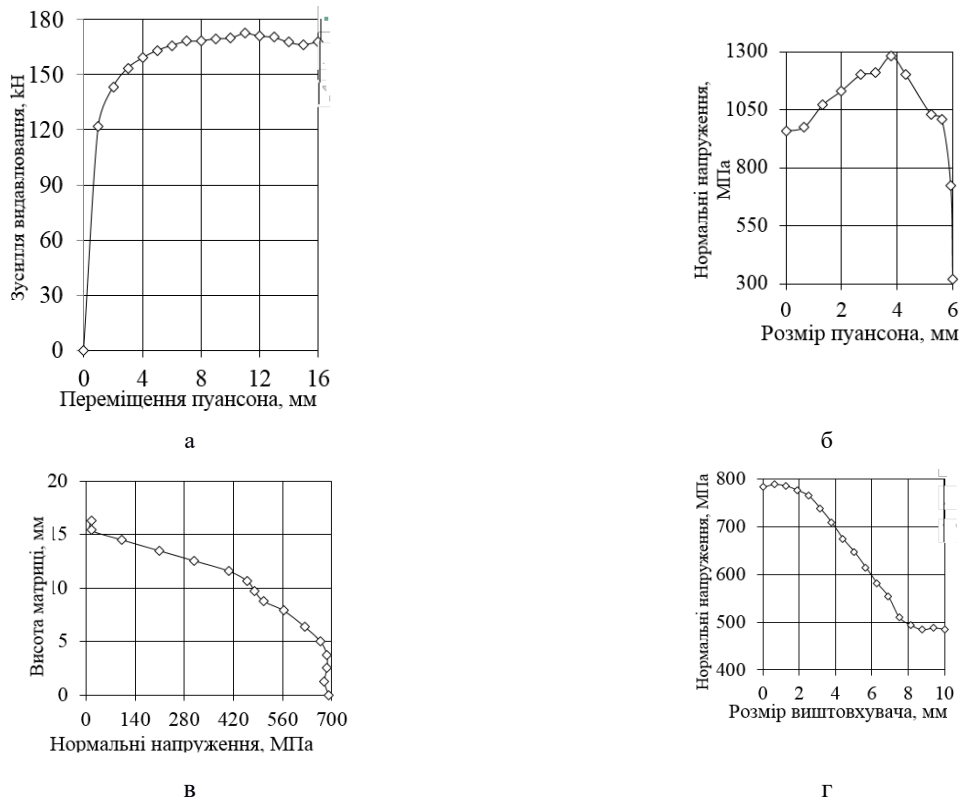


Рис. 3 – Силовий режим видавлювання та розподіли питомих зусиль на деформуючому інструменті  
 а – розподіл таких напружень на поверхні пуансона в перерізі по площині  $xoz$ ; б – розподіл нормальних напружень на вісі пуансона та на довжині; в – розподіл нормальних напружень по висоті поверхні матриці; г – розподіл напружень  $\sigma_n$  на поверхні виштовхувача

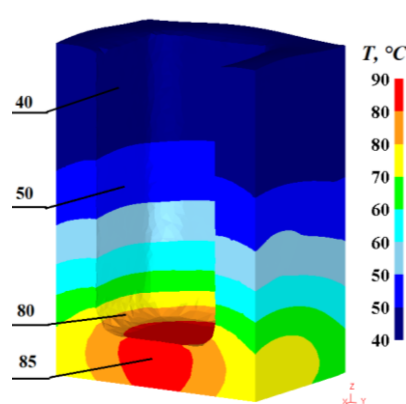


Рис. 4 – Температура здеформованої заготовки в кінці видавлювання

Моделювання з використанням МСЕ також процесі холодного деформування. Розподіл дозволяє визначити зміну температури заготовки в температурі у перерізі здеформованої заготовки

приведений на рис. 4. Найбільша температура у межах  $T=80^{\circ}\div 90^{\circ}\text{C}$  виникає в осередку деформації, який розташований під пуансоном. В області торців стінок температура досягає  $T=40^{\circ}\div 50^{\circ}\text{C}$  зі зростанням до величини  $T=70^{\circ}\div 80^{\circ}\text{C}$  в місцях переходу стінок у донну частину здеформованої заготовки.

Розподіли компонент напружень приведені на рис. 5. На рис. 5а зображений розподіл напружень  $\sigma_z$ . У донній частині здеформованої заготовки виникають стискаючі напруження у межах  $\sigma_z=-300\div -990$  МПа. В місцях переходу донної частини в стінки отримано  $\sigma_z=-170\div -300$  МПа. В самих стінках такі напруження стають розтягувальними і досягають величини  $\sigma_z=200$  МПа у внутрішніх шарах металу стінок. Розподіл напружень  $\sigma_x$  приведений на рис. 5б. У донній частині здеформованої заготовки величини таких напружень знаходяться у межах  $\sigma_x=-380\div -900$  МПа. Практично у всьому об'ємі донної частини здеформованої заготовки виникають стискаючі напруження  $\sigma_y$  (рис. 5в). Розподіл інтенсивності

напружень  $\sigma_i$  показаний на рис. 5г. З нього видно, що осередок деформації під пуансоном розповсюджується на глибину 12 мм у здеформованій заготовці.

Розподіли компонент деформацій у здеформованій заготовці в кінці видавлювання показані на рис. 6. У донній частині виникають стискаючі деформації в напрямку вісі  $z$ , які знаходяться у межах  $\varepsilon_z=-0,1\div -0,9$  (рис. 6а). У стінках ці деформації розтягувальні, причому у зовнішніх шарах металу стінок вони досягають  $\varepsilon_z=0,2\div 0,6$ , а в шарах металу стінок зі сторони порожнини отримано  $\varepsilon_z=0,6\div 1,0$ . Деформації  $\varepsilon_x$  розподілені нерівномірно. У стінках вони розтягувальні і знаходяться у межах  $\varepsilon_x=0,0\div 0,4$ , а в кутових зонах здеформованої заготовки ці деформації стають стискаючими та досягають значень  $\varepsilon_x=-0,1\div -0,3$  (рис. 6б). Практично по всьому об'єму стінок виникають стискаючі деформації  $\varepsilon_y$ , а в донній частині вони стають розтягувальними (рис. 6в).

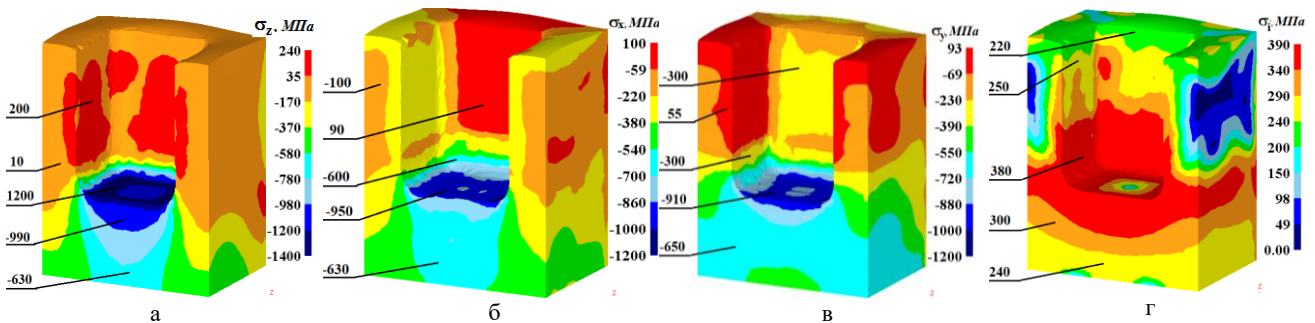


Рис. 5 – Розподіли компонент напружень у перерізі заготовки: а – розподіл напружень  $\sigma_z$ , б – розподіл напружень  $\sigma_x$ , в – розподіл напружень  $\sigma_y$ , г – розподіл інтенсивності напружень  $\sigma_i$

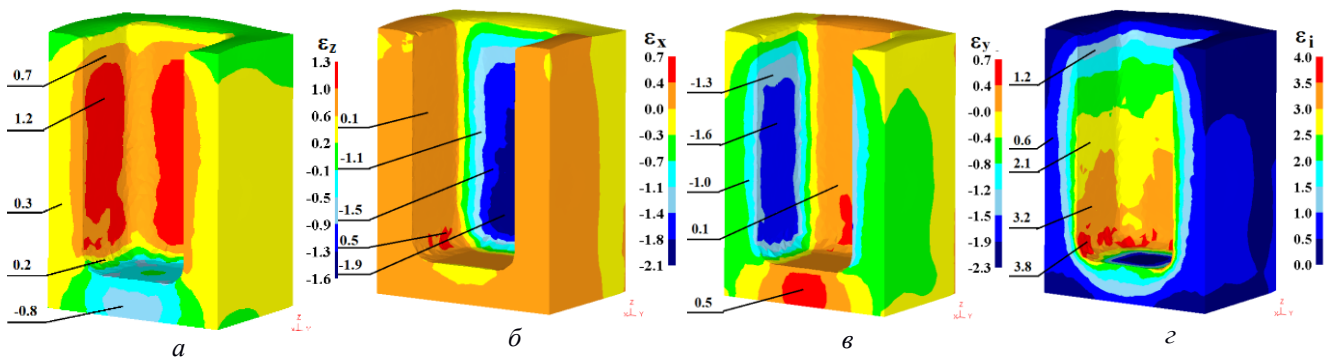


Рис. 6 – Розподіли компонент деформацій у перерізі здеформованої заготовки: а – розподіл деформацій  $\varepsilon_z$ , б – розподіл деформацій  $\varepsilon_x$ , в – розподіл деформацій  $\varepsilon_y$ , г – розподіл інтенсивності деформацій  $\varepsilon_i$

По розподілу інтенсивності деформацій  $\varepsilon_i$  можна оцінити пропрацювання структури металу холодною пластичною деформацією та спрогнозувати межу текучості здеформованого металу. Розподіл  $\varepsilon_i$  показаний на рис. 6г. У донній частині під пуансоном має місце пропрацювання по всій висоті. В області під пуансоном отримано  $\varepsilon_i=1,5\div 2,0$ , а біля торця донної частини –  $\varepsilon_i=0,5\div 1,0$ . У кутових зонах донної частини здеформованої заготовки величини цих

деформацій досягають значень  $\varepsilon_i=0,0\div 0,5$ . По ширині стінок має місце нерівномірний розподіл  $\varepsilon_i$ . В шарах металу стінок зі сторони порожнини отримано  $\varepsilon_i=2,0\div 2,5$ ; по середині стінок –  $\varepsilon_i=1,0\div 1,5$ ; біля зовнішніх поверхонь стінок –  $\varepsilon_i=0,5\div 1,0$ . З використанням експериментальної діаграми істинних напружень для алюмінію Al-2024 по визначених величинах  $\varepsilon_i$  можна спрогнозувати величину напруження текучості  $\sigma_s$  здеформованого

металу. Середнє значення інтенсивності деформацій у стінці складає  $\varepsilon_t=0,8$ . По діаграмі істинних напружень при такій величині  $\varepsilon_t$  маємо  $\sigma_s=370$  МПа. У донній частині під пуансоном отримано  $\varepsilon_t=1,2$ . У цьому місці  $\sigma_s=385$  МПа.

Таким чином, в результаті розрахункового аналізу отримані всі необхідні дані для проектування технології: зусилля видавлювання – для вибору пресового обладнання, розподіл питомих зусиль – для проектування штампного оснащення і прогнозування стійкості деформуючого інструменту, напружено-деформований стан – для прогнозування механічних властивостей здеформованого металу. За результатами розрахунків розроблена конструкція штампного оснащення для видавлювання коробчастого виробу, яка наведена на рис. 7. На рис. 7а показаний вигляд в розрізі, а на рис. 7б – вигляд на нижню плиту. Штамп містить нижню плиту 2 з колонками 12 і верхню плиту 8 з втулками 13. На плиті 2 встановлені штовхач

3, квадратна опорна плита 4 і кругла обойма 5, яка має квадратну опорну поверхню. Обойма 5 закріплена гвинтами 14. Зверху на обоймі 5 з центруванням внутрішньої втулки в квадратному отворі розміщена однобандажована матриця 1 із виштовхувачем 6 і зафіксована за допомогою кільця 7 і гвинтів 15. У верхній плиті 8 встановлений квадратний пуансонотримач 9 з пуансоном 10 і опорною плитою 11 та закріплений гвинтами 16. Штамп встановлюється на гідравлічний прес зусиллям 630 кН.

В вихідному стані перед видавлюванням відстань між нижнім торцем пуансона 10 і поверхнею матриці 1 дещо більша за висоту виробу. В матрицю 1 розміщується вихідна квадратна заготовка. При опусканні верхньої плити виконується видавлювання виробу. Видалення виробу із матриці 1 виконується виштовхувачем 6, який приводиться в рух від виштовхувача пресу через штовхач 3 і опорну плиту 4.

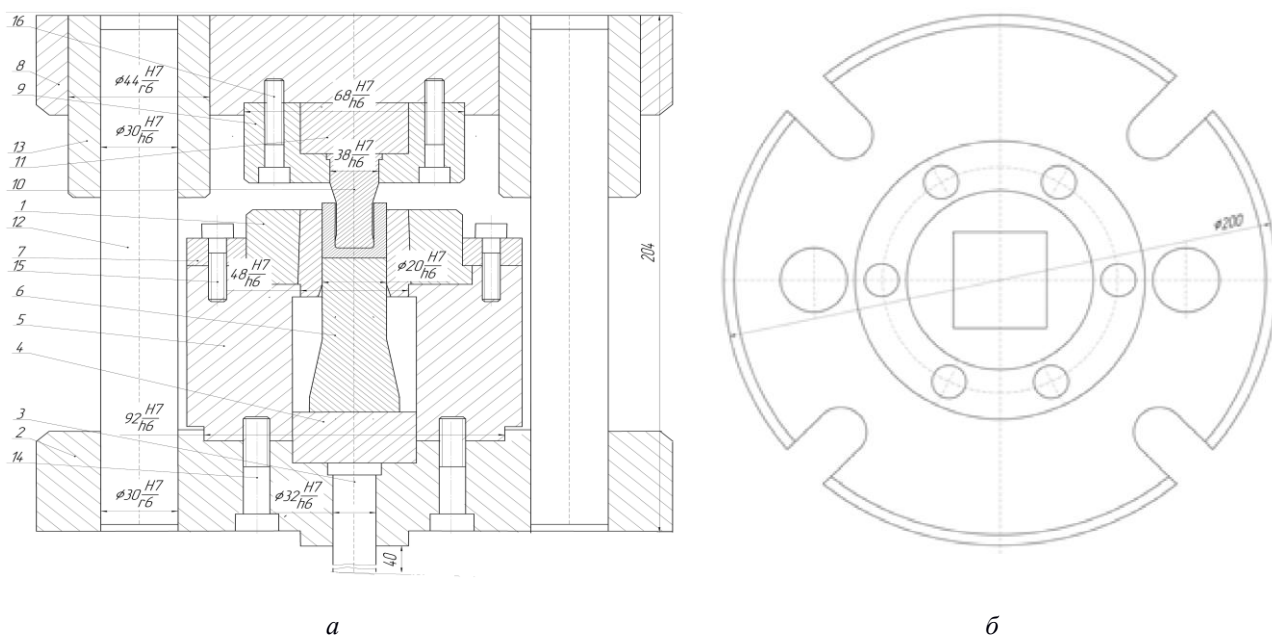


Рис. 7 – Конструкція штампа для видавлювання коробчастого виробу : а – вигляд в розрізі, б – вигляд на нижню плиту

**Висновки.** За допомогою метода скінченних елементів створена математична модель та проведений розрахунковий аналіз холодного зворотного видавлювання із пластичного алюмінію квадратного порожнистого виробу з постійною по периметру товщиною стінки. Встановлені зусилля видавлювання, розподіли питомих зусиль на пуансоні, матриці та виштовхувачі. Виявлений тепловий ефект при видавлюванні і температура здеформованого металу. Визначений напружено-деформований стан в процесі холодного формоутворення. На основі розрахункових даних спроектований штамп для видавлювання.

#### Список літератури

1. Гречников Ф.В. Прогрессивные технологические процессы холодной штамповки / Ф.В. Гречников, А.М. Дмитриев, В.Д. Кухарь и др.; под общ. Ред. А.Г. Овчинникова // – М.: Машиностроение, 1985. – 184 с.
2. Евстратов В.А. Основы технологии выдавливания и конструирования штампов / В.А. Евстратов // – Х.: Вища шк. изд-во при Харьк. ун-те, 1987. – 144 с.
3. Ковка и штамповка: Справочник. В 4-х т. / Ред. совет: Е.И. Семенов (предс.) и др. т.3. Холодная объемная штамповка. Под ред. Г.А. Навроцкого // – М.: Машиностроение, 1987. – 384 с.
4. Семенов И.Е. Выдавливание коробчатых деталей с локальными активными силами трения / И.Е. Семенов, А.В. Иванов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии – Орел, ОГУ, 2019. – № 4-2 (336). – С. 172–181.
5. Каложний В.Л. Аналіз холодного зворотного видавлювання квадратних і прямокутних коробок із сталі і алюмінію / В.Л. Каложний, М.С. Ніколенко, О.В. Мельник // Вісник НТУУ «КПІ». Серія: Машинобудування. – Київ: НТУУ «КПІ», 2011. – №63. – С. 112–117.

## References (transliterated)

1. Grechnikov F.V. Progressivnyye tehnologicheskie processy holodnoj shtampovki / F.V. Grechnikov, A.M. Dmitriev, V.D. Kuhar i dr.; pod obsh. Red. A.G. Ovchinnikova – Moscow: Mashinostroenie, 1985. – 184 p.
2. Evstratov V.A. Osnovy tehnologii vydavlivaniya i konstruirovaniya shtampov / V.A. Evstratov // – KHarkov: Visha shk. izd-vo pri KHark. un-te, 1987. – 144 p.
3. Kovka i shtampovka: Spravochnik. V 4-h t. / Red. sovet: E.I. Semenov (preds.) i dr. Vol. 3. Holodnaya obemnaya shtampovka. Pod red. G.A. Navrockogo – Moscow: Mashinostroenie, 1987. – 384 p.
4. Semenov I.E. Vydavlivanie korobchatyh detalej s lokalnymi aktivnymi silami treniya / I.E. Semenov, A.V. Ivanov // Fundamentalnye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii – Orel, OGU, 2019. – No 4-2 (336). – P. 172–181
5. Kalyuzhnyi V.L. Analiz holodnogo zvorotnogo vidavlyuvannya kvadratnih i pryamokutnih korobok iz stali i alyuminiyu / V.L. Kalyuzhnyi, M.S. Nikolenko, O.V. Melnik // Visnik NTUU «KPI». Seriya: Mashinobuduvannya. – Kiyiv: NTUU «KPI», 2011. – No 63. – P. 112–117.

*Надійшла (received) 22.11.2019*

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

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

**Марчук Констянтин Леонідович (Марчук Константин Леонидович, Marchuk Kostiantyn)**– Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», студент кафедри механіки пластичності матеріалів та ресурсозберігаючих процесів.

**А. В. ЛОСЬ**

### **РЕАЛИЗАЦИЯ ГЛУБОКИХ МОДИФИКАЦИОННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ В ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ВТС: АН-132Д, АН-178 И АН-188**

Европейские специалисты признают, что конкурентоспособные военно-транспортные самолеты во всех категориях (легкие, средние и тяжелые) могут создавать только в США и Украине. На момент появления «Державної комплексної програми розвитку авіаційної промисловості України до 2020 року» мы имели наиболее эффективные: легкий транспортный самолет Ан-32 с грузоподъемностью 6,7 т и дальностью действия 800 км; оперативно-тактический военно-транспортный самолет (ВТС) с грузоподъемностью 30 т и дальностью действия при полной загрузке 4300 км; пассажирский региональный самолет Ан-148-100В с максимальной полезной нагрузкой 9,0 т и дальностью её перевозки на 2600 км. Усилиями всего коллектива ГП «Антонов» на базе этих самолетов спроектированы, изготовлены опытные образцы и частично прошли летные испытания такие их модификации, как Ан-132Д, Ан-178 и Ан-188, реализация которых базируется на использовании новой «Методологии проектирования модификаций военно-транспортных самолетов с учетом глубоких изменений в крыле и в силовой установке». С учетом научных положений этой «Методологии...»: на базе самолета Ан-32 путем глубоких изменений в силовой установке, т. е. использованием двигателей PW150 и увеличением массы топлива в полтора раза, создана модификация легкого ВТС Ан-132Д с грузоподъемностью 9,1 т, дальностью, увеличенной до 2400 км, и с топливной эффективностью до 222 г/т·км, что выше, чем у базовой модели; на базе пассажирского самолета Ан-148 путем глубоких изменений и в геометрии крыла, и в силовой установке создана модификация среднего ВТС – Ан-178 с грузоподъемностью 18 т и дальностью действия при максимальной загрузке 1200 км, что обеспечивает этой модификации «нишу», не занятую конкурентами; обеспечение полного превосходства модификации Ан-188 среди конкурентов-аналогов базируется также на глубоких изменениях: замена в силовой установке ТВД Д27 на турбовентиляторный CFM LEAP-1A; использование дискретной геометрической крутки местных хорд крыла, что обеспечило дальность действия этого самолета до 3200 км при грузоподъемности 47 т и существенно повысило его боеспособность вследствие применения турбовентиляторных двигателей.

Сравнение этих ВТС с их базовыми моделями показывает, что коллектив ГП «Антонов» с честью реализовал направление «Державної комплексної програми розвитку авіаційної промисловості України до 2020 року» в части создания конкурентоспособных военно-транспортных самолетов.

**Ключевые слова:** военно-транспортные самолеты различного назначения, модификации, характеристики «груз – дальность», конкурентоспособность, перевозка грузов, топливная эффективность, рейсовая производительность, грузоподъемность.

**О. В. ЛОСЬ**

### **РЕЗУЛЬТАТИ РЕАЛІЗАЦІЇ ГЛУБОКИХ МОДИФІКАЦІЙНИХ ЗМІН У ВІТЧИЗНЯНИХ ВТЛ: АН-132Д, АН-178 І АН-188**

Європейські спеціалісти визнають, що, конкурентоспроможні військово-транспортні літаки у всіх категоріях (легкі, середні і важкі) можуть створювати тільки США і Україна. На момент появи «Державної комплексної програми розвитку авіаційної промисловості України до 2020 року» ми мали найбільш ефективні: легкий транспортний літак Ан-32 з вантажопідйомністю 6,7 т і дальністю дії 800 км; оперативно-тактичний військово-транспортний літак (ВТС) з вантажопідйомністю 30 т і дальністю дії при повному завантаженні 4300 км; пасажирський регіональний літак Ан-148-100В з максимально корисним навантаженням 9,0 т і дальністю її перевезення на 2600 км. Зусиллями всього колективу ДП «Антонов» на базі цих літаків спроектовані, виготовлені дослідні зразки і частково пройшли льотні випробування такі їх модифікації як Ан-132Д, Ан-178 і Ан-188, реалізація яких базується і на використанні нової «Методології проектування модифікацій військово транспортних літаків з урахуванням глибоких змін в крилі і в силовій установці». З урахуванням наукових положень цієї «Методології...»:

– на базі літака Ан-32 шляхом глибоких змін в силовій установці, т. Е. Використанням двигунів PW150 і збільшенням маси палива в півтора рази, створена модифікація легкого ВТС – Ан-132Д з вантажопідйомністю 9,1 т, зі збільшеною дальністю до 2400 км і з показником паливної ефективності 222 г/т км, що вище, ніж у базової моделі; на базі пасажирського літака Ан-148 шляхом глибоких змін і в геометрії крила, і в силовій установці створена модифікація середнього ВТС Ан-178 з вантажопідйомністю 18 т і дальністю дії при максимальному завантаженні 1200 км, що забезпечує цій модифікації «нішу», не зайняту конкурентами; забезпечення повної переваги модифікації Ан-188 серед конкурентів-аналогів базується також на глибокі зміни: заміни в силовій установці ТВД Д27 на турбовентиляторний CFM LEAP-1A; використанні дискретної геометричної крутки місцевих хорд крила, що забезпечило дальність дії цього літака до 3200 км при вантажопідйомності 47 т і істотно підвищило його боєготовність внаслідок застосування турбовентиляторних двигунів. Порівняльна оцінка цих ВТС з їх базовими моделями показує, що колектив ДП «Антонов» з честью реалізував частину «Державної комплексної програми розвитку авіаційної промисловості України до 2020 року» в частині створення конкурентоспроможних військово-транспортних літаків.

**Ключові слова:** військово-транспортні літаки різного призначення, модифікації, характеристики «вантаж-дальність», конкурентоспроможність, перевезення вантажів, паливна ефективність, рейсова продуктивність, вантажопідйомність.

**A. V. LOS**

### **DEEP IMPLEMENTATION RESULTS MODIFICATION CHANGES IN DOMESTIC MTA: AN-132D, AN-178 AND AN-188**

European specialists recognize that only US and Ukraine can create competitive military transport aircraft in all categories (light, medium and heavy). At the time of the emergence of the "State COMPLEX Program for the Development of the Aviation Industry of Ukraine to 2020" we had the most effective: light transport aircraft An-32 with a capacity of 6.7 t and a range of 800 km; Operational-tactical military transport aircraft (VTS) with a load capacity of 30 tons and a range of full load at 4300 km; An-148-100V passenger regional aircraft with a maximum payload of 9.0 tons and a range of 2600 km. Through the efforts of the whole team of Antonov State Enterprise on the basis of these planes designed, manufactured prototypes and partially passed flight tests such modifications as An-132D, An-178 and An-188, the implementation of which is based on the use of the new "Methodology of designing military transport modifications aircraft taking into account profound changes in the wing and in the power plant." Given the scientific provisions of this "Methodology ...": on the basis of the An-32 aircraft by profound changes in the power plant, ie. Using PW150 engines and increasing the mass of fuel in one and a half times, a modification of light PTS – An-132D with a load capacity of 9.1 t, with an increased range up to 2400 km, was created. and with a fuel efficiency figure of 222 g / t · km, higher than in the base model; on the basis of the passenger aircraft An-148 by deep changes and in the geometry of the wing, and in the power plant created a modification of the average PTS An-178 with a load capacity of 18 tons and a range of maximum load 1200 km, providing this modification "niche", not occupied competitors; ensuring the full advantage of the An-188 modification among its competitors is also based on profound changes: replacement of the D27 power plant with a CFM LEAP-1A turbofan; the use of a discrete geometric twist of the local wing chords, which ensured the range of this aircraft up to 3200 km with a load capacity of 47 t and significantly increased its readiness due to the use of turbofan engines. omparative evaluation of these MTS with their basic models shows that the staff of SE Antonov has honorably implemented part of the "State complex Program for the Development of the Aviation Industry of Ukraine until 2020" in the part of creation of competitive military transport aircraft.

**Keywords:** military airplanes of various purpose, modifications, characteristics of "cargo-range", competitiveness, transportation of goods, fuel efficiency, route performance, carrying capacity



**Введение.** В Украине сложилась уникальная школа по созданию легких (Ан-26, Ан-32), средних (Ан-12, Ан-70) и тяжелых (Ан-22, Ан-124) военно-транспортных самолетов. Многолетняя практика их эксплуатации в нашей стране и в зарубежных странах убедительно доказала их конкурентоспособность, в особенности на рынках перевозок грузов гражданского и военного назначения [1, 2].

Однако неизбежным требованием времени стало дальнейшее их усовершенствования по параметрам увеличения рейсовой и часовой производительности, топливной эффективности, боеготовности и другим условиям конкурентоспособности [3, 4].

На момент появления «Державної комплексної програми розвитку авіаційної промисловості України до 2020 року» [5] мы имели наиболее эффективные самолеты:

- легкий транспортный самолет Ан-32 с грузоподъемностью 6,7 т и дальностью действия 800 км;
- оперативно-тактический ВТС с грузоподъемностью 30 т и дальностью действия при полной загрузке 4300 км;
- пассажирский региональный самолет Ан-148-100В с максимально полезной нагрузкой 9 т и дальностью её перевозки на 2600 км.

Усилиями всего коллектива ГП «Антонов» на базе этих самолетов спроектированы, изготовлены опытные образцы и частично прошли летные испытания такие их модификации, как Ан-132Д, Ан-178 и Ан-188, что является весомым вкладом в выполнение «Державної комплексної програми розвитку авіаційної промисловості України до 2020 року» [6 – 8].

**Научные положения, использованные при проектировании Ан-132Д, Ан-178 и Ан-188.** При проектировании этих модификаций использованы:

- огромный собственный опыт и материалы ГП «Антонов» как ведущей мировой фирмы по созданию ВТС различного назначения;
- результаты тщательного анализа американских, европейских и японских фирм, создающих самолеты-конкуренты в секторе легких, средних и тяжелых ВТС;
- новые научные разработки автора в виде моделей реализации глубоких модификационных изменений при геометрической перекомпоновке крыла и её согласования в условиях замены маршевых двигателей.

Такие положения являются научной основой «Методологии...», основная цель которой связана с непрерывным ростом рейсовой и часовой производительности нового самолета, т. е. с увеличением грузоподъемности, дальности действия и крейсерской скорости, а также с повышением топливной эффективности ВТС.

В рамках этой «Методологии...» разработаны модели:

- геометрической перекомпоновки крыла и всей системы несущих поверхностей «крыло + агрегаты

хвостового оперения» в целях снижения индуктивного сопротивления при заданной величине подъемной силы;

- согласования параметров модифицированного крыла с параметрами силовой установки при замене маршевых двигателей;

– обеспечения требуемой топливной эффективности уже на этапе предварительного проектирования на основе согласования изменений в крыле и в силовой установке.

Основным улучшением в исходной модели Ан-32 стал выбор нового маршевого двигателя PW150, что оказало существенное влияние на все основные летно-технические и экономические характеристики его модификации Ан-132Д.

При таком изменении в силовой установке основные параметры Ан-132Д составили:

- максимальная грузоподъемность 9,1 т;
- максимальная дальность с максимальной грузоподъемностью 1200 км;
- топливная эффективность 222 г/т·км в крейсерском полете с максимальной грузоподъемностью.

Кроме того, ВТС Ан-132Д обладает и рядом других преимуществ:

- переменные обороты воздушного винта  $n_{\text{â}} = 850 \dots 1200 \text{ \u044d/}\text{\u0430}$  ;
- «тихое руление» при  $n_{\text{â}} = 850 \text{ \u044d/}\text{\u0430}$  в пределах аэродрома;
- чрезвычайный режим работы маршевого двигателя при отказе одного из двух не только при взлете, но и, если необходимость, на маршруте;
- значительно лучшие экологические показатели по вредным выбросам маршевого двигателя и шуму на местности.

Военно-транспортный самолет Ан-178 создан на базе пассажирского варианта Ан-148 с геометрической перекомпоновкой крыла и с заменой его маршевых двигателей типа Д36-5АФ на двигатель Д436-148FM, что обеспечило для ВТС Ан-178 увеличение максимальной грузоподъемности до 18 т и дальности действия (при максимальной грузоподъемности) до 1200 км, т. е. «нишу» конкурентоспособности, не занятую конкурентами-аналогами.

Рассматриваются несколько вариантов совершенствования этой модификации. Описание последующих конфигураций необходимо и для базовой модели, и для будущих вариантов, чтобы показать путь к успешному развитию этого самолета как типа.

Эта дифференциация позволяет расположить эти варианты в правильном порядке временной шкалы. Рассматриваемые варианты отличаются в основном введением новых систем и участием в их поставке хорошо зарекомендовавших себя смежных компаний (табл. 1).

Таблица 1 – Возможные изменения в системах среднего ВТС Ан-178

	AN-178	AN-178T	AN-178-111
Fuselage Фюзеляж	X	X	X
Wing Крыло	X	X	X
Empenage Оперение	X	X	X
Engines – Ivchenko-Progress Двигатели – Ивченко-Прогресс	X	X	
Engines – GE Двигатели –			X
Engine Mounting Ivchenko-Progress Установка двигателя Ивченко-Прогресс	X	X	

Оперативно-тактический ВТС Ан-188 создан на базе отечественного Ан-70 в целях полного превосходства в сравнении с А400М и С-2 путем использования на этапе проектирования:

• замены в силовой установке турбовинтового двигателя Д27 на турбовентиляторный CFM LEAP 1A;

• дискретной геометрической крутки местных хорд крыла, чем реализовано существенное снижение индуктивного сопротивления.

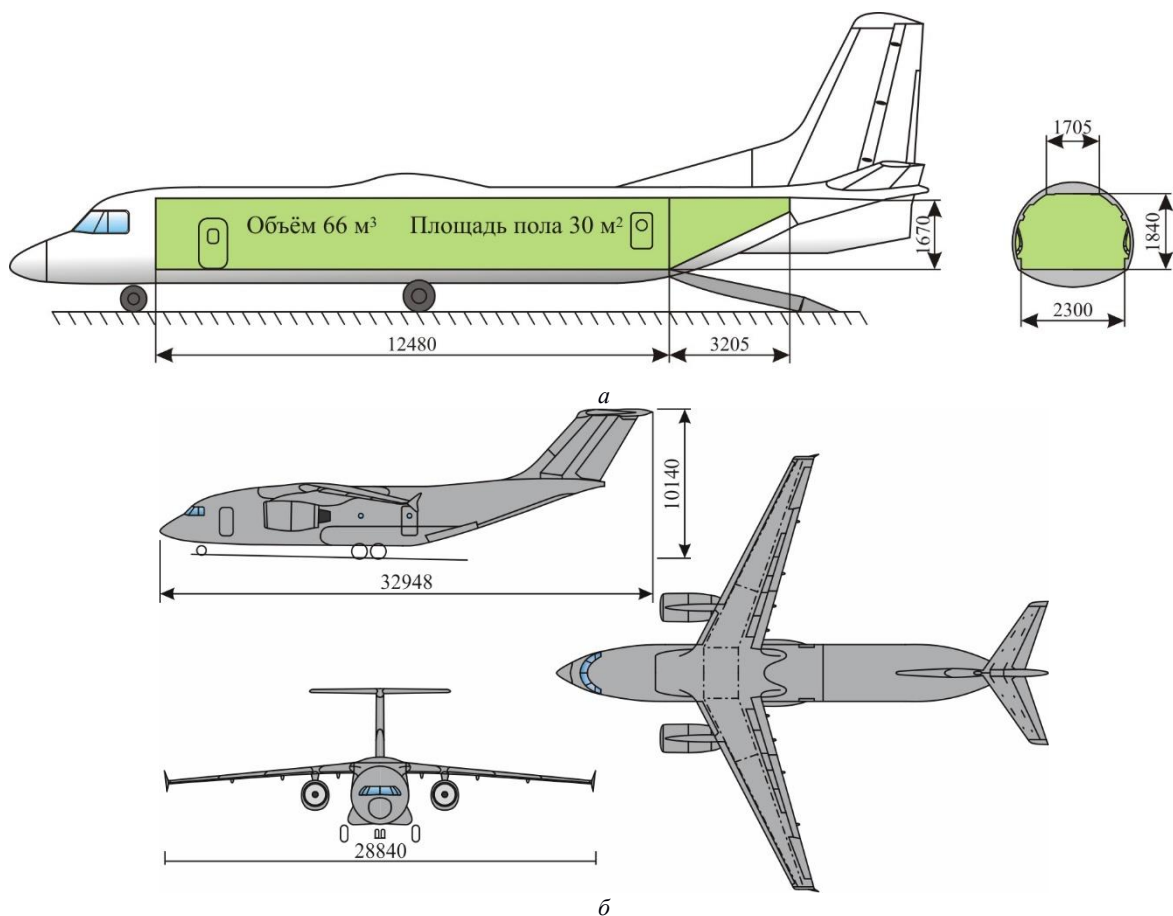


Рис. 1 – Современные военно-транспортные самолеты:  
а – легкий Ан-132Д; б – средний Ан-178; в – оперативно-тактический Ан-188

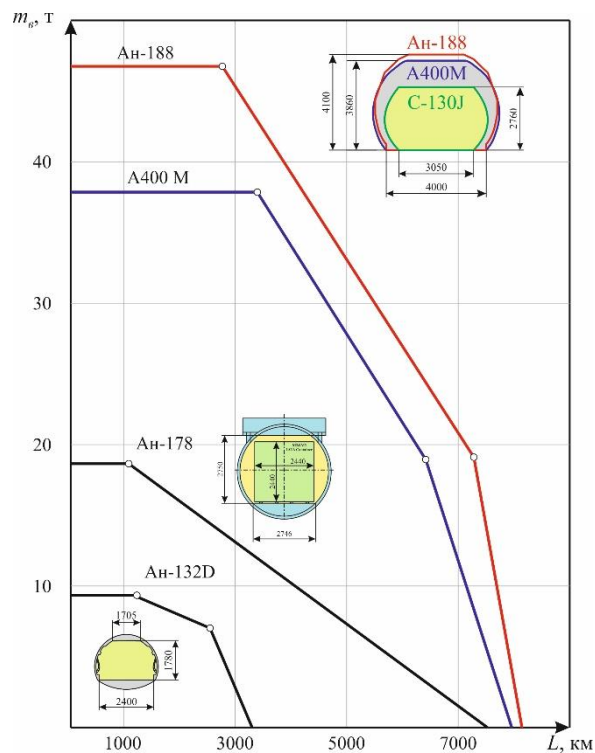


Рис. 2 – Характеристики «груз – дальность действия» модификаций отечественных ВТС, создаваемых в рамках реализации «Державної програми...»

Такое решение обеспечило превосходство этого самолета не только по грузоподъемности, но и по дальности действия и боеготовности.

Таким путем, с использованием моделей глубоких модификационных изменений в геометрии крыла и в силовой установке спроектированы ВТС: легкий – Ан-132Д, средний – Ан-178, оперативно-тактический – Ан-188 (рис. 1, 2).

Самолет Ан-188 с его непревзойденными характеристиками по грузоподъемности и габаритам грузовой кабины, по сравнению с А400М может стать важной альтернативой для новых заказчиков. Стратегия должна заключаться в том, чтобы не только предлагать Ан-188 в качестве единственного самолета, но и в сочетании с самолетами Ан-132/178. Поскольку Ан-188 является прототипом самолета Ан-70, серийное производство которого не было начато, необходимо провести подробный анализ, чтобы определить риски сертификации и производства, а также затраты в сочетании Ан-132Д, Ан-178 и Ан-188.

**Выводы.** В рамках реализации «Державної комплексної програми розвитку авіаційної промисловості України до 2020 року» колективом ГП «Антонов» созданы такие военно-транспортные самолеты: легкий – Ан-132Д, средний – Ан-178, оперативно-тактический – Ан-188.

В их создании на этапе предварительного проектирования использованы модели реализации глубоких модификационных изменений в геометрии крыла и в силовой установке при замене маршевых двигателей, а также модели согласования таких изменений.

С учетом такой концепции:

- на базе самолета Ан-32 путем глубоких изменений в силовой установке, т. е. использованием двигателей PW150 и увеличением массы топлива в полтора раза, создана модификация легкого ВТС Ан-132Д с грузоподъемностью, увеличенной до 9,1 т, с дальностью, увеличенной до 1200 км, при полной загрузке и с показателем топливной эффективности 222 г/т·км, что выше, чем у базовой модели;

- на базе пассажирского самолета Ан-148 путем глубоких изменений и в геометрии крыла, и в силовой установке создана модификация среднего ВТС Ан-178 с грузоподъемностью 18 т и дальностью действия при максимальной загрузке 1200 км, что обеспечивает этой модификации «нишу» использования, не занятую конкурентами-аналогами;

- обеспечение полного превосходства модификации Ан-188 среди конкурентов-аналогов базируется также на глубоких изменениях:

- замена в силовой установке ТВД Д27 на турбовентиляторный CFM LEAP-1А;

- использование дискретной геометрической кривки местных хорд крыла, что обеспечило дальность действия этого самолета до 3200 км при грузоподъемности 47 т и существенно повысило его боеготовность вследствие применения турбовентиляторных двигателей.

Сравнение этих ВТС с их базовыми моделями показывает, что коллектив ГП «Антонов» с честью реализовал часть «Державної комплексної програми розвитку авіаційної промисловості України до 2020 року» в направлении развития военно-транспортной авиации в Украине.

## Список литературы

1. Балабуев П. В. Основы общего проектирования самолетов с газотурбинными двигателями : учеб. пособие / П. В. Балабуев, С. А. Бычков, А. Г. Гребеников. Харьков : ХАИ, 2003. – Ч. 2. – 389 с.
2. Богданов О. К. Альтернативные возможности создания тяжелого дальнего ВТС / О. К. Богданов и др. // ОКБ им. Антонова. Технический отчет № 8971. – 1971.
3. Горбулин В. П. Оборонно-промышленный комплекс Украины – современное состояние и реструктуризация / В. П. Горбулин, А. С. Довгопольский, О. И. Приходько // Технологические системы. – 2001. – Вып. 2 (8). – 2001. – С. 5-20.
4. Кривов Г. А. Мировая авиация на рубеже XX–XXI столетий. Промышленность, рынки / Г. А. Кривов, В. А. Матвиенко, Л. Ф. Афанасьева // Київ : Вища шк. 2003. – 295 с.
5. Державна комплексна програма розвитку авіаційної промисловості України до 2020 р. – Затв. Постановою Кабінету Міністрів України № 1665-25 від 12.12.2001 р.
6. AN-132D Preliminary ground and flight tests first stage. Технический акт № 132D.700.024.D3-117 ГП «Антонов», 2017. – 72 с.
7. AN-178 High level roadmap. ГП «Антонов», 2016. – 57 с.
8. Ан-188 Средний военно-транспортный самолет укороченного взлета и посадки ГП «Антонов». – Киев, 2018. – 118 с.

## References (transliterated)

1. Balabuev P. V. *Osnovy obshhego proektirovaniya samoletov s gazoturbinnymi dvigateljami: ucheb. posobie* / P. V. Balabuev, S. A. Bychkov, A. G. Grebenikov // Har'kov: HAI, 2003. – Ch. 2 – 389 p.
2. Bogdanov, O. K. *Al'ternativnye vozmozhnosti sozdaniya tzhelogo dal'nego VTS* / O. K. Bogdanov, V. F. Eroshin i dr. // OKB im. Antonova. Tehnicheskij otchet № 8971. – 1971.
3. Gorbulin, V. P. *Oboronno-promyshlennyj kompleks Ukrainy – sovremennoe sostojanie i restruktizacija* / V. P. Gorbulin, A. S. Dovgopol'skij, O. I. Prihod'ko // Tehnologicheskie sistemy. – 2001. Vyp. 2 (8). – 2001. – P. 5–20.
4. Krivov, G. A. *Mirovaja aviacija na rubezhe XX-XXI stoletij. Promyshlennost', rynki* / G. A. Krivov, V. A. Matvienko, L. F. Afanas'eva // K.: KVShh, 2003. – 295 p.
5. Derzhavna kompleksna programa rozvitku aviacijnoi promislivosti Ukraïni do 2020 r. – Zatv. Postanovoju Kabinetu Ministriv Ukraïni № 1665 – 25 vid 12.12.2001 r.
6. AN-132D Preliminary ground and flight tests first stage. Tehnicheskij akt № 132D.700.024.D3-117 GP «Antonov», 2017. – 72 p.
7. AN-178 High level roadmap. GP «Antonov», 2016. – 57 p.
8. An-188 Srednij voenno-transportnyj samolet ukorochnennogo vzleta i posadki [Tekst] GP «Antonov». – Kiev, 2018. – 118 p.

Поступила (received) 18.12.2019

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

**Лось Александр Васильевич (Лось Олександр Васильович, Los Aleksandr Vasilyevich)** – канд. техн. наук, вице-президент ГП «Антонов», Киев, Украина, ул. Туполева 2, e-mail: systems.an@ukr.net, <http://orsid.org|0000-000-3848-6734>

*А. Г. НАРЫЖНЫЙ, М. Е. ТАРАНЕНКО*

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ЛИСТОВОЙ ЗАГОТОВКИ ПРИ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

Проведен совместный анализ результатов математического моделирования и технологических экспериментов в сопоставимых условиях, предполагающих действие на заготовку двух электрических разрядов со смещением во времени начала в двух погружных камерах. Адекватность модели проявляется в отражении таких важных особенностей как самопроизвольный переход волнового движения элементов в колебательный, характер колебательного движения заготовки, потеря устойчивости формы и складкообразование, развитие и взаимодействие различных парогазовых полостей. Методика численной реализации модели обеспечивает исследование процессов при очень высокой степени деформации элементов технологической системы, что позволяет использовать модель и методику для исследования и параметрической оптимизации технологического процесса штамповки и технологической оснастки в соответствии с различными целевыми функциями. Отмеченные количественные различия параметров, определяемых посредством моделирования и технологического эксперимента обусловлены сложной взаимосвязью разнообразных процессов, а также различием значений параметров модели и установки.

**Ключевые слова:** электрический разряд в жидкости, математическое моделирование процесса штамповки, ударные волны, деформация листовой заготовки, пластичность, импульсная нагрузка

*О. Г. НАРИЖНИЙ, М. Є. ТАРАНЕНКО*

### ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСА ПОСЛІДОВНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ ЛИСТОВОЇ ЗАГОТОВКИ ПРИ ЕЛЕКТРОГІДРАВЛІЧНОМУ НАВАНТАЖЕННІ

Проведений сумісний аналіз результатів математичного моделювання та технологічних експериментів в близьких умовах, що припускають дію на заготовку двох електричних розрядів із зсувом початку за часом у двох занурених камерах. Адекватність моделі виявляється у відображенні таких важливих особливостей як спонтанний перехід хвильового руху елементів до коливань, характер коливань заготовки, втрата стійкості форми та складкоутворення, розвиток та взаємодія різних паро-газових порожнин. Методика чисельної реалізації моделі забезпечує дослідження процесів за умов дуже високої деформації елементів технологічної системи, що дозволяє використовувати модель та методику для дослідження та параметричної оптимізації технологічного процесу штампування і технологічного оснащення відповідно різних цільових функцій. Відзначені якісні відмінності параметрів, які визначаються за допомогою моделювання та технологічного експерименту, обумовлені складним взаємозв'язком різноманітних процесів, а також початковою різницею параметрів.

**Ключові слова:** електричний розряд в рідині, математичне моделювання процесу штампування, ударні хвилі, деформація листової заготовки, пластичність, імпульсне навантаження

*F. G. NARYZNY, M. YE. TARANENKO*

### INVESTIGATION OF THE PROCESS OF SEQUENTIAL DEFORMATION OF THE SHEET BILLET UNDER ELECTROHYDRAULIC LOADING

It is performed joint analysis of simulation and technological experiment results in comparable condition, expecting action on blank up two electric charges with time lag of beginning in two submersible cameras.

Adequacy of model reveals itself such important particularities in reflection as spontaneous turning the wave motion element to oscillatory, nature of the oscillatory moving the blank, buckling and folding, development and interaction different vapour-gas cavity. The numerical realization methods of models provide the study of the processes with very high degree of deformation of element technological system element that allows to use the model and methods for study and parametric optimization of the technological stamping process and technological rig in accordance with different target function. The noted distinctions of degree parameters, which are defined by means of simulation and technological experiment are conditioned by complex intercoupling of the varied process, as well as difference of importance parameters of models and installation.

**Keywords:** electrical discharge in a liquid, mathematical modeling of the stamping process, shock waves, deformation of a sheet stock, ductility, impulse load

**Введение.** Электрогидравлический эффект (ЭГЭ) с середины прошлого века успешно применяется для штамповки крупногабаритных тонкостенных деталей [1]. В результате технологических экспериментов и опытно-промышленного применения изучено влияние технологических параметров на протекание процессов в пространстве-времени, выявлены свойства и особенности процессов, предложены и успешно использованы приемы параметрического управления процессом электрогидравлической штамповки (ЭГШ). Однако достичь оптимального соотношения параметров техпроцесса ЭГШ для полного использования положительных возможностей ЭГШ с применением лишь экспериментального подхода практически не удается из-за его большой трудоемкости, материалоемкости, стоимости и длительности.

Применение альтернативного подхода к исследованию и оптимизации процессов,

математического моделирования, требует разработки и обоснования адекватной модели, а также методики ее реализации. Эти методические вопросы необходимо решать в комплексе, учитывая противоречивые особенности механического поведения элементов: подвижность вязкой жидкости, очень высокую деформируемость и подвижность газоплазменной фазы, упруго-пластический характер деформирования заготовки, импульсный характер возмущения, а также ударно-контактный характер взаимодействия элементов.

Известны несколько математических моделей описывающих процесс штамповки при ЭГ-нагрузении, например [6–8], где использованы упрощенные модели деформирования плоских заготовок под действием ЭГЭ без учета действия ПГП, как отдельного элемента системы. Действие ПГП на жидкость отображается посредством

импульсного давления, которое меняется во времени по форме полусинуса (параметры функции определяются экспериментально). Заготовки имитировались упруго-пластичной моделью со скоростным упрочнением по Джонсону-Куку [9].

Для обоснования адекватности оригинальной модели и точности ее реализации целесообразно применить методику для анализа хорошо изученного экспериментальным методом объекта, что позволяет учесть действие всех факторов в совокупности и взаимосвязи.

**Цель работы** – обоснование методического подхода для сокращения времени и расхода ресурсов при технологической подготовке производства крупногабаритных листовых деталей с высоким качеством и низким уровнем вредной технологической наследственности.

#### Задачи работы:

- совместный анализ результатов моделирования и технологических экспериментов;
- обоснование адекватности возможностей методики моделирования.

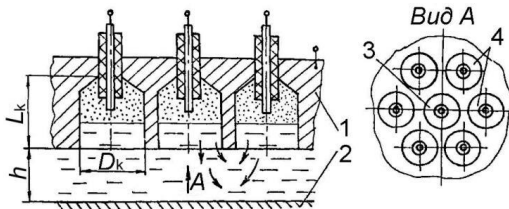


Рис. 1 – Принципиальная схема многозарядного блока [1]: 1 – разрядная камера; 2 – предмет обработки; 3 – камера, в которой производится основной разряд; 4 – шесть камер, в которых производятся дополнительные разряды; точками обозначена зона ПГП

Для решения поставленных задач была использована следующая установка (рис. 1). В 2-х полостях жесткой плиты происходит два электрогидравлических (ЭГ) разряда. При этом за короткий промежуток времени выделяется определенное количество тепловой энергии. Она приводит к образованию парогазового пузыря (ПГП) в жидкости, которой заполняет полости, пространство между плитой и предметом обработки. В первые моменты времени ПГП расширяясь в направлении открытого торца полости разгоняет находящуюся перед ним жидкость в пределах полости. Скорости перемещения жидкости велики и от границы ПГП и жидкости отслаивается ударная волна (или пакет ударных волн), формирующая и направляющая поток жидкости в осевом направлении. После выхода ударных волн пределы полости движение жидкости поддерживается расширяющимся ПГП. Поток жидкости в пределах пространства между жесткой плитой и предметом обработки образует импульсную затопленную струю жидкости, перемещающуюся в сторону предмета обработки. Математическая модель такого процесса описана ранее в работе [2].

Отличие рассматриваемого процесса заключается в том, что ЭГ-разряд происходит в двух соседних полостях не одновременно, а некоторым

смещением по времени, соизмеряемым с длительностью процесса, проходящего в исследуемом пространстве.

Предмет обработки представляет собой вязко-упруго-пластически деформируемую тонкую пластину. Места ее опоры находятся далеко от зоны деформации, что позволяет рассматривать свободное деформирование пластины.

Начальные условия моделирования следующие: расстояние между осями камер – 60 мм, диаметр камер – 40 мм, величина зазора между торцом камер и плоскостью предмета обработки – 40 мм. Электрические параметры разрядной цепи: напряжение разряда – 25 кВ, емкость батареи конденсаторов – 42 мкФ, индуктивность разрядной цепи – 3 мкГн, активное среднее значение сопротивления разрядного промежутка – 0,04 Ом. Т. о. запасаемая электрическая энергия равна 13,125 кДж, а длительность первого полупериода разрядного тока, согласно [1], принимается равной 134 мкс (при принимаемом значении количества энергии, выделившейся за первый полупериод по отношению к общей энергии 0,8).

Рассматривается процесс деформирования листовой заготовки диаметром 320 мм в вытяжное кольцо диаметром 252 мм. Толщина заготовки 1,0 мм. Условно считается, что вытяжки фланца заготовки не происходит. Материал заготовки – упруго-пластический алюминиевый сплав со степенным законом упрочнения вида  $\sigma = Ae^n$ , где  $A=463$  МПа,  $n=0,122$ . Начальное значение предела текучести 2100 МПа, плотность 2700 кг/м<sup>3</sup>. Передающая среда – вода плотностью 1000 кг/м<sup>3</sup>, с объёмным модулем сжатия 22500 МПа, давлением кавитации 10<sup>4</sup> Па. Среда ПГП – идеальный газ с показателем адиабаты 0,26 и плотностью при нормальных условиях 1,25 кг/м<sup>3</sup>.

Условиями моделирования предусмотрено, что ЭГ-разряды производятся в 2-х соседних камерах со сдвижкой по времени в диапазоне 10...550 мкс.

На первых этапах моделирования рассмотрена физическая (механическая) картина формоизменения плоской заготовки. На рис. 2 показано развитие ПГП в двух соседних камерах, в левой из которых ЭГ-разряд происходит с задержкой по времени относительно первого на 350 мкс или в относительном значении времени

$$E = \frac{t}{\tau_1} = 2,61$$

Здесь  $\tau_1$  – длительность первого полупериода ЭГ-разряда. Картина формоизменения ПГП после его выхода за пределы камеры (ее торца) показана «на просвет» в моменты времени  $\bar{t}^* = 0,57; 0,57; 2,28; 4,57; 8,57$  относительно времени смещения второго разряда.

В первые моменты времени развивающийся ПГП имеет цилиндрическую формулу с округлой вершиной. В нем преобладают осевые скорости, а радиальные расширения минимальны. Это благоприятствует большему КПД передачи энергии

заготовке. В момент времени  $\bar{t}^* = 0,57$  заготовка имеет волны, которые формируют направление передачи запасенной энергии. По мере приближения ППП к заготовке ее осевая симметрия нарушается, и полость принимает грибовидную форму ( $\bar{t}^* = 2,28$ ).

Развитие второй полости (левой), в которой концентрация энергии больше, чем в правой полости, приводит к смещению правой полости вправо и пластическая деформация зоны заготовки, находящейся под ней, увеличивается по сравнению с аналогичной зоной под правой полостью. Это, скорее всего, объясняется уже сформированным кинетическим потоком в передающей среде и заготовке.



Рис. 2 – Последовательное изменение формы ППП и заготовки в моменты времени  $\bar{t}^* = 0,57; 2,28; 4,57; 8,57$  (результаты моделирования). Точки на изображениях объектов свидетельствуют о проникновении сеток одного объекта моделирования в область другого объекта



Рис. 3 – Теневые кадры формы заготовки при локальном нагружении

На окончательных этапах процесса прогиб заготовки имеет максимальное значение под левой полостью (где более позднее выделение энергии) и монотонно изменяются по радиусу. Этот вывод получен при относительно небольшом расстоянии между камерами, равном 1,5 диаметра камеры. Экспериментально, при относительном расстоянии 2,2 получено, что под каждой камерой образуются две отдельные пуклевки с участком отрицательной кривизны между ними (рис. 3, левый кадр). Локальное

нагружение на участке между пуклевками деформирует этот участок с единственным максимумом (рис. 3, правый кадр).

Следует отметить, что максимальное относительное увеличение объемов ППП равно  $\sim 32320$  единиц для правой полости и  $\sim 37940$  единиц для левой. Возможность расчета в условиях столь больших деформаций обусловлено применяемым методом ALE (Arbitrary Lagrangian-Eulerian).

Теневая картина развития и взаимодействия струи жидкости, выходящей из разрядной полости под действиями ЭГ-разряда, показана на рис. 4. В этом случае производился «медленный» разряд с энергией значительно меньшей, чем в условиях моделирования. На последовательных кадрах с шагом 96 мкс видно, что на выходе струя имеет цилиндрическую форму (верхний ряд кадров) по мере приближения к плоскости жесткой преграды она начинает расширяться и у нее появляются радиальные составляющие скорости (средний ряд кадров). После смыкания струи с поверхностью преграды (нижний ряд кадров) радиальные составляющие скорости увеличиваются. Струя как-бы прилипает к преграде и растекается по ней, но осевая симметрия сохраняется.

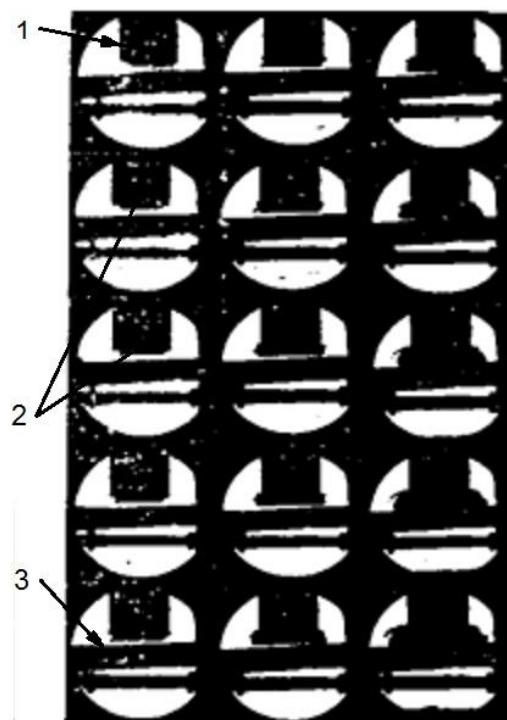


Рис. 4 – Последовательное перемещение границы ППП к заготовке: 1 – корпус разрядной камеры; 2 – границы ППП; 3 – жесткая преграда

В целом, модельное поведение струи на начальном этапе процесса соответствует экспериментальной картине процесса.

Далее было исследовано формоизменение листовой заготовки под действием локально приложенной нагрузки. Наибольшие значения прогибов наблюдаются в зоне влияния вне центрального импульса и равно  $\sim 20$  мм. Изолинии прогибов имеют вид овалов. Наибольшие значения

пластических деформаций и интенсивности напряжений наблюдаются в зонах, прилегающих к перетяжному ребру матрицы.

На рис. 5 показаны цветовые картины распределения осевых перемещений оболочки (м), справа даны цветовые шкалы, сверху отмечены моменты времени (мс). Перемещения, в основном, отрицательны, только лишь на фланце они практически неизменны. На левом рисунке видно, что совокупное действие волн давления приводит к локальному деформированию, имеющему вид вытянутой области. Дальнейшее деформирование заготовки происходит под действием импульса давления жидкости, имеющего пространственно-распределенный характер, что приводит более равномерному распределению перемещений в радиальных направлениях. Наконец, правый рисунок показывает окончательное распределение перемещений, область максимальных перемещений получила почти круговую форму с центром, смещенным в сторону оси второй камеры. Отметим на втором и третьем рисунках волнистый характер картины распределения на периферии, который представляет образование складок. Все картины

имеют симметричный характер относительно горизонтальной линии, проходящей через оси обеих погружных камер. Отмеченные особенности деформирования наблюдаются в реальности.

На рис. 6 показаны цветовые картины распределения осевых скоростей оболочки. На левом рисунке видно, что все скорости в центральной части оболочки направлены вниз, а само распределение неоднородно, область наибольших скоростей имеет вытянутую форму. Результатом этой особенности является распределение перемещений, показанное на рис. 5, слева. На среднем рисунке отмечено начало неоднородности движения, максимальные скорости наблюдаются в двух симметричных отдельных областях. На периферии поле скоростей сильно неоднородно, что приводит к образованию складок. На правом рисунке отмечено начало колебаний заготовки, в пяти синих отдельных участках оболочка движется вниз, а в помеченном красным участке – вверх. Отдельность участков движения объясняется сформировавшимися гофрами, которые обуславливают переменную жесткость оболочки в окружном направлении.

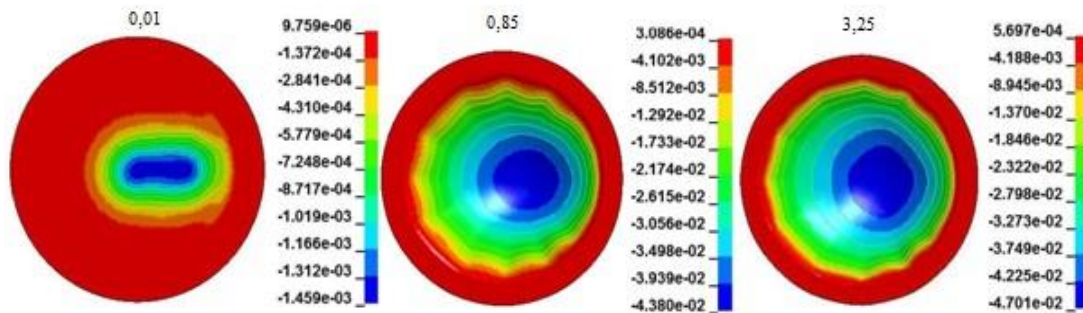


Рис. 5. Картины распределения осевых перемещений оболочки

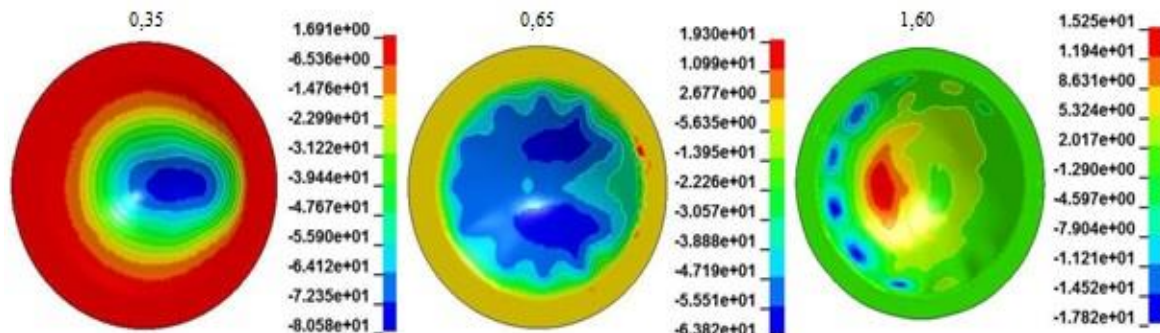


Рис. 6 –

Образование складок на периферийной области примыкающей части заготовки вызвано большими пластическими деформациями в ней, чем в центральной части (рис. 7). В результате площадь поверхности заготовки на периферии увеличивается и

под действием нагрузки каждая материальная точка с диаметром  $D$  перемещается на меньший диаметр  $d$  (на рис. 7 показано стрелкой). Вследствие этого в периферийной зоне образуется сжимающее тангенциальное окружное напряжение, приводящие к



потере устойчивости формы заготовки и образованию складок (рис. 8). Они наблюдаются как при вытяжке, так и при формовке. Более интенсивное складкообразование проходит при деформировании более тонкостенных заготовок. На этапах до штамповки складки растягиваются, но это происходит при определенной форме готовой детали. Для исключения неровности поверхности детали нужно устанавливать соответствие формы детали и последовательности деформирования.

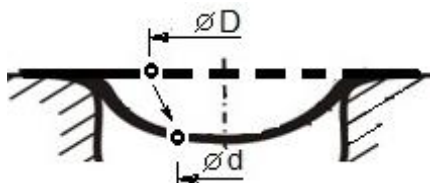


Рис. 7 – Схема перемещения материальной точки заготовки при штамповке дна

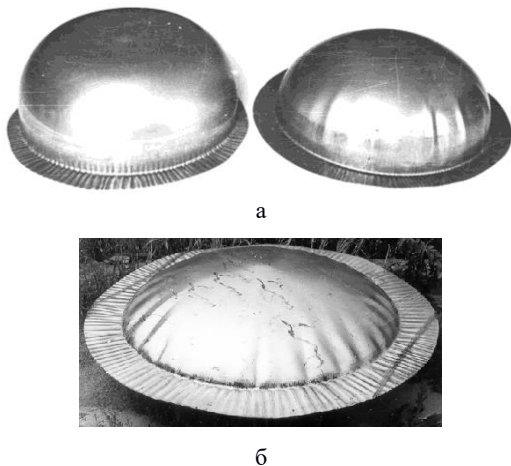


Рис. 8 – Характерные формы отштамповок на промежуточных этапах формоизменения:  
а – материал 08 кп, диаметр 303 мм, толщина 0,8 мм; слева готовая деталь, справа – промежуточный этап вытяжки;  
б – дно диаметром ~ 1,0 м, толщиной 1,5 мм, сталь 12 x 18 Н9Т

На рис. 9 показаны расчетные временные зависимости осевых скоростей отдельных точек заготовки, которые сравнимы с аналогичными

экспериментальными зависимостями (рис. 10) для разных материалов деформирования в этих зонах. Наибольшее значение скоростей наблюдаются в зонах действия нагружающих импульсов.

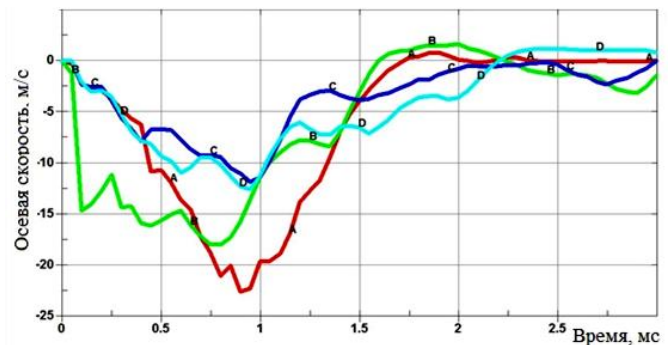


Рис. 9 – Расчетные зависимости осевых скоростей точек заготовки: А – в центре вне центрального импульса; В – в центре первого центрального импульса; С – в точке диаметрально противоположной В; D – в точке на диаметре, перпендикулярном АВ

Расчетные кривые отражают колебательный характер процесса деформации заготовки особенно с начала процесса, особенно до момента 1,5 мс. Точки С и D колеблются дольше, что, скорее всего, связано с упругим характером

Экспериментальные кривые (для разных материалов) тоже носят колебательный характер. Период колебаний заготовки лежит в пределах 145...220 мкс, причем большие периоды характерны для более деформационно-упрощающихся металлов Д16АМ и АМг6БМ. Следует оговориться, что на рис. 10 показаны значения математического ожидания параметров и доверительный интервал скоростей лежит в пределах 12...16%. Точность определения времени значительно выше.

Совпадение характера колебаний заготовки, получены в расчете, с экспериментальными результатами свидетельствует об адекватности математической модели реальному процессу деформации. Некоторое различие частотных параметров колебаний можно объяснить разными начальными условиями.

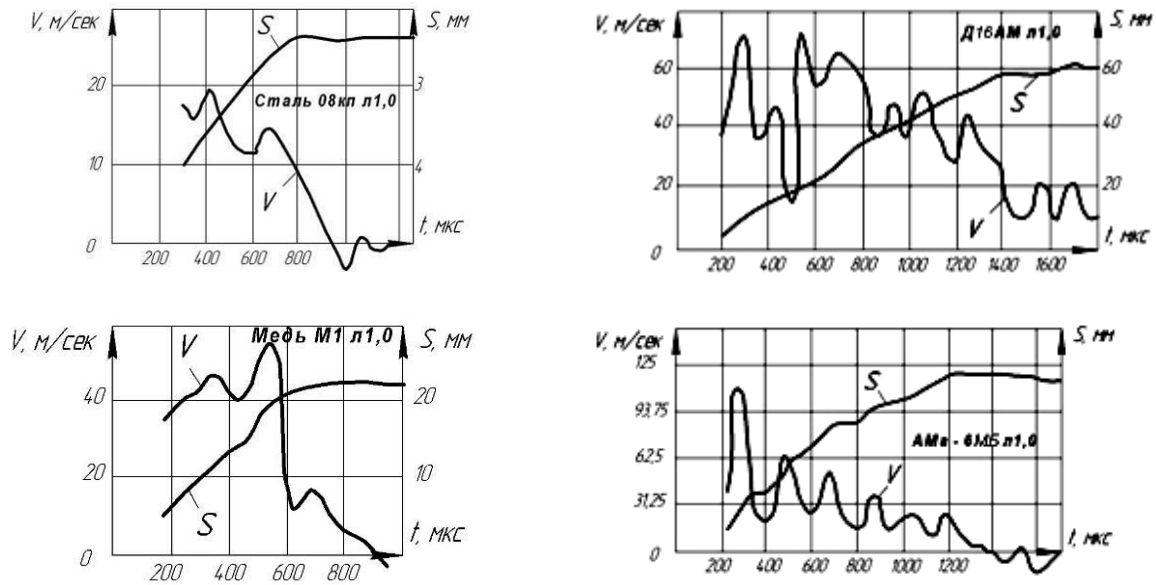


Рис. 10 – Временная зависимость скорости (V) и перемещения (S) центральной точки заготовки при центральном нагружении ЭГ- разряда (42 мкФ, U=19 ...25 кВ, межэлектродное расстояние 25 мм, длительность выделения энергии <100 мкс)

Представляет интерес временная зависимость интенсивности напряжений в заготовке, показанная для двух точек: под центральной (А) и вне центральной (В) камерами (рис. 11).

Как следует из рис. 9, 11 в рамках континуальной модели протекание процесса деформирования наблюдается его немонотонность и создаются предпосылки для реализации колебательного характера пластической деформации.

Отметим явно немонотонный характер распределения напряжений в пространстве и во времени. Это в сочетании с дополнительным внешним управляющим виброимпульсным нагружением со специально подобранной частотой может привести к проявлению некоторых положительных эффектов: релаксации остаточных напряжений, повышению пластичности материала заготовки и др. [4, 5].

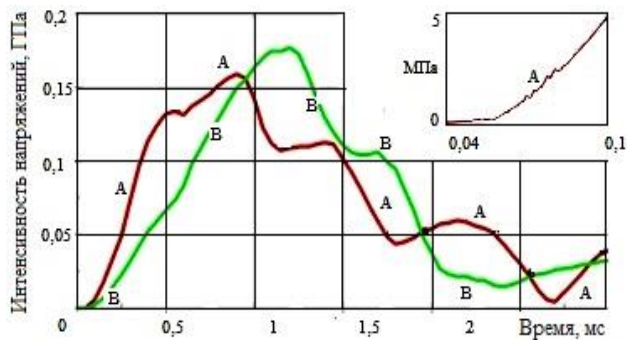


Рис. 11 – Изменение интенсивности напряжений в заготовке по времени процесса деформирования и на начальном этапе (вставка)

## Выводы

1. Использованная математическая модель процесса ЭГ-штамповки адекватно описывает его в условиях нагружения заготовки с использованием двух погружных камер и возбуждаемых в них со смещением по времени действия импульсов. Адекватность модели проявляется в отражении таких важных особенностей как самопроизвольный переход волнового движения элементов в колебательный, характер колебательного движения заготовки, потеря устойчивости формы и складкообразование, развитие и взаимодействие различных ПГП.

2. Методика численной реализации модели обеспечивает исследование процессов при очень высокой степени деформации элементов технологической системы, что позволяет использовать модель и методику для исследования и параметрической оптимизации технологического процесса штамповки и технологической оснастки в соответствие с различными целевыми функциями.

3. Отмеченные количественные различия параметров, определяемых посредством моделирования и технологического эксперимента обусловлены сложной взаимосвязью разнообразных процессов, а также различием значений параметров модели и установки. Необходимо совершенствовать модель и выполнить моделирование с рациональным выбором параметров модели.

## Список литературы

1. Тараненко, М. Е. Электрогидравлическая штамповка: теория, оборудование, техпроцессы [Текст]: монография в 2 ч. / М. Е. Тараненко. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского «Харьк. авиац. ин-т», 2011, – 272 с.
2. Нарыжный, А. Г. Вычислительная модель электрогидравлического эффекта / А. Г. Нарыжный // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосмич. ун-та им. Н. Е. Жуковского «Харьк. авиац. ин-т». – Х., 2012. – Вып. 54. – С. 112-124.
3. Тараненко, М. Е. Разработка ресурсосберегающих технологий и электрогидравлических процессов с пространственно-временным управлением нагружения для штамповки крупногабаритных листовых деталей [Текст]: дис... д-ра техн. наук: 05.03.05; защищена 13.03.05; утв. 19.10.98/Тараненко Михаил Евгеньевич. – Х., 1996 – 389 с.
4. Дідик, П. П. Фізичні основи міцності: підручник [Текст] / П. П. Дідик, Е. В. Кузнецов і В. М. Забара. – Д.: Наука та освіта, 2005. – 608 с.
5. Зуев, Л. Б. Микроскопическая физика пластической деформации металлов / Л. Б. Зуев // Успехи физики металлов. – 2015. Т. 16, № 1. – С. 35–60.
6. Mane T. Finite element modeling of electro-hydraulic forming of sheets [Текст] / T. Mane, V. Goel, S.D. Kore // 3rd international conference on materials processing and characterisation (ICMPC 2014), Proceedia materials science, 2014. – V. 6 – P. 105–114.
7. Atieh S. First results of SFR cavity fabrication by electro-hydraulic forming at CERN [Текст] / S. Atieh, A.A. Carvalho, I.A. Santillana et al // Proceedings of SFR 2015, Whistler, BC, Canada. Pre-press Release 25 sept. 2015. – P. 1–7.
8. Bjorkstrom D. FEM simulation of electrohydraulic forming [Текст] / D. Bjorkstrom // Diploma thesis. Stockholm: Kungliga Tekniska Hogskolan. – 2008. – 88 p.
9. Johnson G.R. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures [Текст] / G.R. Johnson, W.H. Cook // Proceedings of the 7<sup>th</sup> international symposium on ballistics. 1983. P. 541–547.

## References (transliterated)

1. Taranenko M. E. Jelektrogidravlicheskaja shtampovka: torija, oborudovanie, tehprocessy : monografija v 2 ch. [Текст] / М. Е. Тараненко. – Kharkiv: Nac. ajerokosm. un-t im. N. E. Zhukovskogo «KHAИ», 2011. – 272 p.
2. Naryzhnyy, A. G. Vychislitel'naya model elektrogidravlicheskogo effekta / A. G. Naryzhnyy // Otkrytyye informatsionnye i kompyutemyye integrirovannyye tekhnologii: sb. nauch. tr. Nats. aerokosmich. un-ta im. N. E. Zhukovskogo «Khark. aviats. in-t». Kharkiv. – 2012. – Vyp. 54. – P. 112–124.
3. Taranenko. M. E. Razrabotka resursosberegayushchikh tekhnologiy i elektrogidravlicheskih protsessov s prostranstvenno-vremennym upravleniyem nagruzheniya dlya shtampovki krupnogabaritnykh listovykh detaley. Tekst: dis... d-ra tekhn. nauk: 05.03.05; zashchishchena 13.03.05; utv. 19.10.98/ Taranenko Mikhail Evgenyevich. – Kharkiv. 1996 – 389 p.
4. Didik R. P. Fizichni osnovi micnosti : pidruchnik [Текст] / R. P. Didik, E. V. Kuznecov i V. M. Zabara. – Dnipropetrovsk : Nauka ta osvita, 2005. – 608 p.
5. Zuyev, L. B. Mikroskopicheskaya fizika plasticheskoy deformatsii metallov / L.B. Zuyev // Uspekhi fiziki metallov. 2015. – Vol.16. No 1. – P. 35–60.
6. Mane T. Finite element modeling of electro-hydraulic forming of sheets Tekst / T. Mane. V. Goel. S.D. Kore // 3rd international conference on materials processing and characterisation (ICMPC 2014). Proceedia materials science. 2014. – V. 6 – P. 105– 114.
7. Atieh S. First results of SFR cavity fabrication by electro–hydraulic forming at CERN [Текст] / S. Atieh. A.A. Carvalho. I.A. Santillana et al // Proceedings of SFR 2015. Whistler. BC. Canada. Pre-press Release 25 sept. 2015. – P. 1–7.
8. Bjorkstrom D. FEM simulation of electrohydraulic forming / D. Bjorkstrom // Diploma thesis. – Stockholm: Kungliga Tekniska Hogskolan. 2008. –88 p.
9. Johnson G.R. A constitutive model and data for metals subjected to large strains. high strain rates and high temperatures [Текст] / G.R. Johnson. W.H. Cook // Proceedings of the 7th international symposium on ballistics. 1983.– P. 541–547.

Поступила (received) 20.12.2019

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

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

**Нарыжный Александр Георгиевич (Нарыжний Олександр Георгійович, Naryzhny Aleksandr G.)** – кандидат технических наук, доцент, Национальный аэрокосмический университет им. М. С. Жуковского «Харьковский авиационный институт», м. Харьков, тел. (050)040-297-50, e-mail: o.naryzhny@khai.edu

**К. Л. НОЗДРАЧОВА**

### **КОМБІНОВАНІ ЄМНІСНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ІМПУЛЬСАМИ УЛЬТРАЗВУКОВИХ ХВИЛЬ РЕЛЕЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МЕТАЛОВИРОБІВ**

Обґрунтована доцільність застосування безконтактних методів контролю визначення фізико-механічних властивостей металовиробів. Наведено порівняння з сучасними безконтактними методами контролю, визначена перевага застосування ємнісних перетворювачів при даному виді контролю. Розглянута методика і принцип проведення неруйнівного контролю із застосуванням безконтактних комбінованих ультразвукових ємнісних перетворювачів. Описані реалізації комбінованих ємнісних перетворювачів для контролю імпульсами ультразвукових поверхневих хвиль, які дозволять не тільки підвищити ефективність дефектоскопії та чутливість при визначенні неоднорідності пружних характеристик металовиробу вздовж його поверхні, а й забезпечити високу захищеність від когерентних акустичних завад.

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

**Е. Л. НОЗДРАЧЕВА**

### **КОМБИНИРОВАННЫЕ ЕМКОСТНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ИМПУЛЬСОВ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН РЕЛЕЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕТАЛЛОИЗДЕЛИЙ**

Обоснована целесообразность применения бесконтактных методов контроля определения физико-механических свойств металлоизделий. Приведено сравнение с современными бесконтактными методами контроля, выделено преимущество применения емкостных преобразователей при данном виде контроля. Рассмотрена методика и принцип проведения неразрушающего контроля с применением бесконтактных комбинированных ультразвуковых емкостных преобразователей. Описанные реализации комбинированных емкостных преобразователей для контроля импульсами ультразвуковых поверхностных волн, которые позволят не только повысить эффективность дефектоскопии и чувствительность при определении неоднородности упругих характеристик металлоизделия вдоль его поверхности, но и обеспечить высокую защищенность от когерентных акустических помех.

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

**K. L. NOZDRACHOVA**

### **COMBINED CAPACITY TRANSDUCERS FOR THE TESTING OF THE ULTRASONIC RELAY WAVES OF THE PHYSICO-MECHANICAL PROPERTIES OF METAL PRODUCTS**

Testing of the physical and mechanical properties of materials is one of the important areas of non-destructive quality testing of materials, parts, products and structures. The non-destructive testing allows to pass from selective check of these properties on specially made samples to their one hundred percent control on finished products without their destruction or damage. This increases the reliability of the product quality assessment and reduces costs. The control by acoustic methods is based on the establishment of interrelation of physical-mechanical, technological, structural characteristics of materials and products with their acoustic characteristics. The expediency of application of noncontact methods of testing of determination of physical and mechanical properties of hardware is presented. The comparison with modern noncontact methods of testing is given, the advantage of using capacitive transducers in this type of testing is determined. The technique and principle of non-destructive testing using contactless combined ultrasonic capacitive converters are considered. The implementation of combined capacitive transducers for controlling the pulses of ultrasonic surface waves, which will not only increase the efficiency of flaw detection and sensitivity in determining the heterogeneity of the elastic characteristics of the metal along its surface, but also provide high protection against coherent acoustics.

**Keywords:** ultrasonic testing, noncontact transducer, capacitive transducer, electric field, electrical impulses, measurements, diagnostics, surface waves.

**Вступ.** Контроль фізико-механічних властивостей матеріалів – один з важливих напрямків неруйнівного контролю (НК) якості матеріалів, деталей, виробів та конструкцій. НК дозволяє перейти від вибіркової перевірки цих властивостей на спеціально виготовлених зразках до їх стовідсоткового контролю на готових виробах без їх руйнування або пошкодження. Це підвищує достовірність оцінки якості продукції і скорочує витрати. Контроль акустичними методами заснований на встановленні взаємозв'язку фізико-механічних, технологічних, структурних характеристик матеріалів і виробів з їх акустичними характеристиками [1].

До основних фізико-механічних характеристик матеріалів, що визначаються акустичними методами, відносять: пружні (модуль нормальної пружності, модуль зсуву, коефіцієнт Пуассона); міцності (міцність при різних деформаціях); технологічні (щільність, пластичність, вологість, вміст окремих компонентів, гранулометричний склад і ін.); структурні (анізотропія матеріалу, кристалічність або

аморфність, розміри кристалів, впорядкованість кристалічної решітки); розміри, форма і зміст включень (наприклад, графітних в чавуні); глибина поверхневого гарту і ряд інших.

Акустичні методи дозволяють оцінювати тільки ті властивості матеріалу, які впливають на умови збудження, проходження, відбиття і заломлення пружних хвиль або на режими коливальних об'єкта контролю. Це швидкості поширення хвиль різних типів, хвильовий опір матеріалів, коефіцієнти поглинання і розсіяння пружних хвиль, власні частоти конструкцій, їх добротність, механічний імпеданс і ін. Основні з них – швидкості поширення і коефіцієнт загасання пружних хвиль.

Контроль фізико-механічних властивостей акустичними методами заснований на аналітичних або кореляційних зв'язках вимірних акустичних параметрів з значеннями оцінюваних властивостей матеріалу. Якщо контрольована властивість має з

вимірюваним параметром чіткої аналітичний зв'язок, вона може бути визначена з високою точністю. Так, усі три пружні постійні матеріалу (модуль Юнга  $E$ , модуль зсуву  $G$  і коефіцієнт Пуассона  $\nu$ ) однозначно визначаються по вимірним значенням швидкостей поширення поздовжньої і поперечної об'ємних хвиль. Точність такої оцінки залежить від точності вимірювання зазначених швидкостей і може бути дуже високою [2].

Контроль фізико-механічних властивостей матеріалів часто вимагає вимірювання швидкості і загасання ультразвуку з підвищеною точністю. Це пов'язано з дуже малими змінами деяких інформативних акустичних параметрів при варіації контрольованого параметра в широких межах. Наприклад, зміна твердості або міцності сталі в широких межах змінює швидкість звуку всього на 1 ... 2%. Тому використання стандартних способів вимірювання швидкості звуку, що реалізуються в УЗ-товщиномірах і дефектоскопах, в даному випадку часто не правомірні. Потрібна більш точна апаратура, та нові способи вимірювання коефіцієнта загасання.

Гранична точність вимірювання швидкості відповідає похибці 0,001 ... 0,01%. Точність вимірювання загасання значно нижче. Похибки в 10% вважаються гарним результатом.

Тому пошук нових більш точних і енергозберігаючих методів неруйнівного контролю є актуальною і своєчасною задачею. Так, при безконтактному методі контролю відпадає необхідність застосування контактної рідини і ретельної зачистки поверхні, так як збудження ультразвуку відбувається в поверхневому шарі електропровідного виробу, що прискорює і здешевлює процес контролю.

**Аналіз літературних джерел інформації та постановка проблеми.** Одним з джерел УЗК, який демонструє значну перспективу, є ємнісний безконтактний перетворювач (або електростатичний акустичний перетворювач), але було зібрано мало експериментальних доказів для підтвердження його передбачуваного теоретичного опису [3]. Ємнісні перетворювачі з вузькою смугою пропускання були досліджені для вимірювання абсолютної швидкості без необхідності поправок вимірювань [4–7] для вимірювань зміни температурних властивостей матеріалу [8–12], в той час як широкосмугові ємнісні детектори широко відомі для роботи з акустичною емісією [13–19]. Однак, як широкосмугові джерела, вони не привернули такої уваги. Повідомлялося лише у кількох дослідженнях [20–23], і в двох з них основна увага приділялася впливу електричних матеріалів в міжелектродному проміжку [21, 22]. Робився наголос на характеристику джерела, хоча, передбачалося, що перетворення електричної енергії в акустичну відбувається через електростатичну силу на поверхні зразка.

В одній з цитованих робіт [20] було проведено порівняльне дослідження семи ультразвукових джерел, основний інтерес яких полягав у пошуку стандартного джерела для калібрування систем

виявлення акустичної емісії. Широкосмуговий ємнісний перетворювач був одним з досліджених джерел і, незважаючи на його знижену чутливість, показав багато примітних аспектів продуктивності. Однак в цій роботі і до наших днів не досліджувалися ефекти зміни напруги збудження і накладеного зміщення або поведінки поза епіцентру. Тому, більш детальне дослідження широкосмугового ємнісного перетворювача є актуальним завданням.

У різних областях ультразвукової дефектоскопії використовуються зразки, призначені для настройки чутливості глибиномірних пристроїв дефектоскопів, визначення похибок товщиномірів і структуроскопії, передачі розміру одиниць швидкості поширення і коефіцієнта загасання УЗ коливань і т.д. Основними параметрами всіх типів зразків є або швидкість або загасання, або те й інше. Залежно від класу приладу накладаються певні вимоги на однорідність зразків по швидкості і загасання. Наприклад, для налаштування дефектоскопів досить, щоб неоднорідність не перевищувала 0,5% за швидкістю [24] і 10–20% по загасання; для товщиномірів і структуроскопії 0,1% [25] 5–10% відповідно. Для стандартних зразків, призначених для передачі розміру одиниць швидкості і коефіцієнта загасання, ці вимоги ще більш жорсткі.

Для вимірювання коефіцієнта загасання і швидкості поширення поздовжніх УЗ хвиль в твердих середовищах і передачі засобом вимірювань нижчого розряду розміру одиниць цих фізичних величин розроблена установка описана в [26–33]. Вона дозволяє також вимірювати групову швидкість поширення зсувних хвиль. В установці ІЗУ-1 реалізований ємнісний метод генерації і прийому УЗ коливань, заснований на застосуванні ємнісних перетворювачів (ЕП) з тонкоплівкових оксидних діелектриком.

При вирішенні ряду прикладних задач виникає необхідність визначення акустичних параметрів в об'єктах, що мають малу товщину [34]. У цьому випадку застосування традиційних луна-імпульсних методів недоцільно, так як для тонких зразків вони не забезпечують необхідну точність вимірювання, а іноді їх просто неможливо реалізувати. Тому, для проведення вимірювань даної складності розробляються нові методи і засоби, де в якості випромінювача і приймача ультразвукових коливань все частіше застосовують ємнісні перетворювачі [34–36], які мають широку смугу випромінювання і прийому ультразвукових імпульсів, а так само головною перевагою яких є безконтактність проведення контролю. При цьому, отримані результати показують [37], що ємнісний метод дозволяє визначити якість тонкостінних виробів, в разі, коли застосування оптичних або радіаційних методів - традиційних для подібних об'єктів, неможливо. Так само в [35, 37] описується можливість і актуальність використання ємнісних перетворювачів для прийому релеєвських хвиль і хвиль Лемба, збуджуваних будь-якими методами.

Підвівши підсумки робіт [34–37] в даному напрямку висока складність методик і необхідність

врахування безлічі різних факторів в процесі проведення вимірювань, що в свою чергу тягне за собою необхідність пред'явлення дуже високих вимог до операторів еталонних установок. В роботі [38] було розроблено алгоритмічне і програмне забезпечення, що дозволяє використовувати існуючі та розроблені еталонні установки в сукупності з сучасними цифровими приладами з метою освіти інформаційно-вимірювального комплексу по визначенню параметрів поширення різних типів акустичних хвиль в твердих середовищах. Автором запропоновано ряд методик вимірювань. Для імпульсного режиму запропоновані методики знаходження швидкості зсувної складової імпульсу при наявності перешкоди, методика визначення частотної залежності швидкості поширення і коефіцієнта загасання УЗ коливань. Для резонансного режиму запропонована методика визначення додаткової дифракційної поправки при знаходженні коефіцієнта загасання, а також методика визначення коефіцієнта загасання і швидкості ультразвукових коливань при наявності перешкоди, що залежить від частоти (при значеннях коефіцієнта загасання до 2000 дБ / м). Запропоновані методики дозволяють підвищити точність, а також розширити діапазон вимірювань відповідних фізичних величин. Тому реалізація ємнісного методу ультразвукового контролю вимірювання фізичних величин електровиробів у більш спрощеному варіанті, який дозволяв би проводити контроль і обробляти сигнали з достатньою точністю являється досить актуальною проблемою.

**Мета роботи:** розробка безконтактних ємнісних перетворювачів ультразвукового контролю для визначення дефектів і неоднорідності фізико-механічних характеристик металів з високою достовірністю за допомогою акустичних імпульсів.

**Основна частина.** Методика проведення безконтактного контролю за допомогою застосування ємнісних перетворювачів полягає в тому, що в електропровідному виробі 1 (рис. 1) наводяться ультразвукові хвилі 2, які виникають в результаті перетворення електричної енергії в ультразвукову (механічну) [39]. Високочастотні електричні імпульси подаються на металеву пластину (як одну з обкладок перетворювача) 3, що має діелектричний прошарок 4, з генераторів постійної 5 та змінної 6 напруг. Блок управління 7 задає управляючий сигнал на синхронізатор імпульсів 8, який керує часом запуску генераторів 5 і 6, в результаті у виробі виникають ультразвукові імпульси заданої частоти та заповнення. Прикладання до пластини перетворювача постійної напруги необхідно для виключення подвоєння частоти, а змінної напруги для збудження ультразвукових хвиль. Має місце і зворотній ефект, коли ємнісним перетворювачем можна приймати ультразвукові імпульси і перетворювати їх в електричні сигнали, які надходять на підсилювач 9, перед яким включена роздільна ємність  $C_1$ . З підсилювача 9, імпульси, через блок управління 7 візуалізуються на екрані 10 дефектоскопа чи осцилографу.

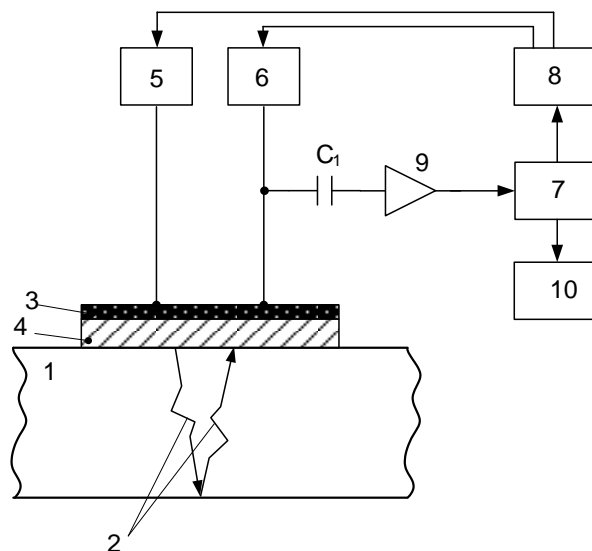


Рис. 1 – Блок-схема реалізації методики контролю ємнісним методом ультразвукового неруйнівного контролю

Другою обкладкою ємнісного перетворювача служить сам об'єкт контролю 1, або стандартний зразок, по якому відбувається настроювання макета приладу. Тому, верифікацій такого перетворювача може бути досить багато за рахунок зміни його конструкції і призначення. Наприклад, було розроблено перетворювачі, що випромінюють хвилі

Релея, приклад яких наведено на рис. 2, рис. 3, що дозволяє підвищити точність визначення фізико-механічних характеристик металу за рахунок відносного методу вимірювання двома ідентичними приймаючими високочастотними полосковими електродами.

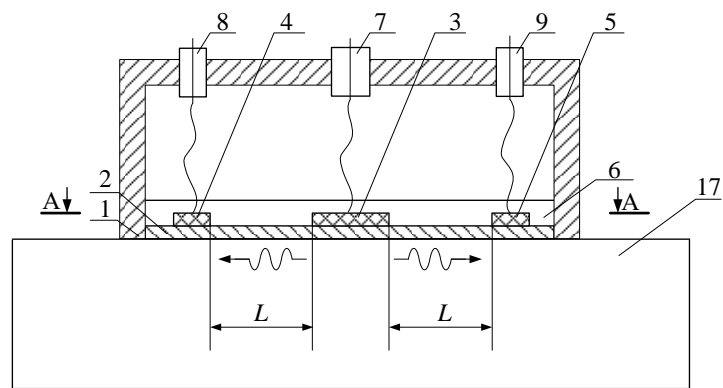


Рис. 2 – Схематичне зображення комбінованого емнісного перетворювача для контролю імпульсами ультразвукових поверхневих хвиль та його розміщення на ОК

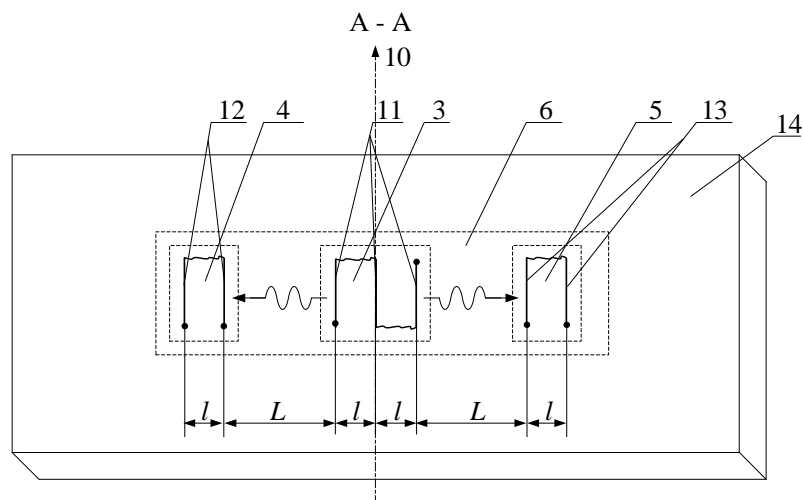


Рис. 3 – Схематичне розташування в неелектропровідній неферомагнітній основі над поверхнею ОК секцій полоскових електродів комбінованого ЕП для контролю імпульсами ультразвукових поверхневих хвиль.

ЕП працює наступним чином. ЕП, який має корпус 1, розташовують над поверхнею ОК 14, як це зображено на рис. 1. Через з'єднувач 7 на секцію 3 з полосковими елементами 11 подається постійна висока напруга і імпульсна напруга. В поверхневому шарі ОК 14 за рахунок взаємодії постійного і імпульсного електричних полів збуджуються імпульси поверхневих хвиль, які поширюються в обидві сторони від секції 3. Через з'єднувачі 8 і 9 на полоскові елементи 12 та 13 подається постійна висока напруга. При однаковій відстані  $L$  між секціями 4 і 5 та при однакових властивостях поверхні виробу ОК 14 на полоскових елементах 12 і 13 що розташовуються паралельно на відстані  $l$  секцій 4 і 5 відповідно збуджується ЕРС з однаковою фазою. При відмінності фізико-механічних властивостей поверхневих шарів ОК 14 між секцією 3 та секціями 4

і 5 на полоскових елементах 12 і 13 збуджується ЕРС з різними фазами. Величина відмінності фаз визначає відмінність фізико-механічних властивостей поверхневих шарів ОК 14, що знаходяться між секціями 3 та 4 і 5. Стрілками позначено напрямки поширення імпульсів збуджених ультразвукових хвиль. Протектор 2 захищає ЕП від пошкоджень під час механічного сканування поверхні ОК 14.

На рис. 4 наведена друга реалізація емнісного перетворювача, що має високу захищеність від когерентних акустичних завод за рахунок орієнтації довгих частин 12 і 13 полоскових елементів секцій 4 і 5 на відстані  $l$  між збуджуючою та приймальною секціями ЕП і орієнтації полоскових елементів секцій 4 і 5 під кутами  $70^\circ+10^\circ$ . Окрім того, поверхня ОК 14 сканується тільки в одній його частині в напрямку осі 10.

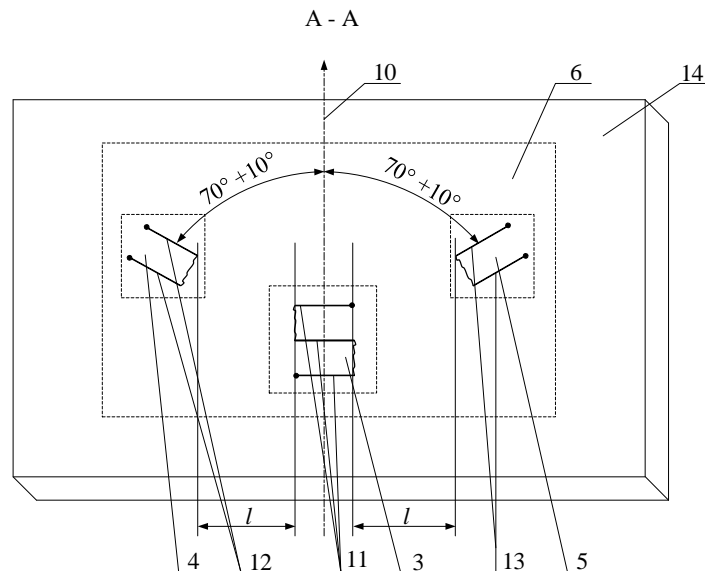


Рис. 4 – Схематичне розташування секцій полоскових електродів ЄП на поверхні ОК та орієнтація полоскових електродів

Представлений на рис. 5, рис. 6 підвищити ефективність ультразвукового контролю широкопуговий ємнісний перетворювач для за рахунок виконання відстаней між полосковими контролю електропровідних виробів імпульсами електродами ЄП змінними в заданому інтервалі. ультразвукових поверхневих хвиль дозволяє

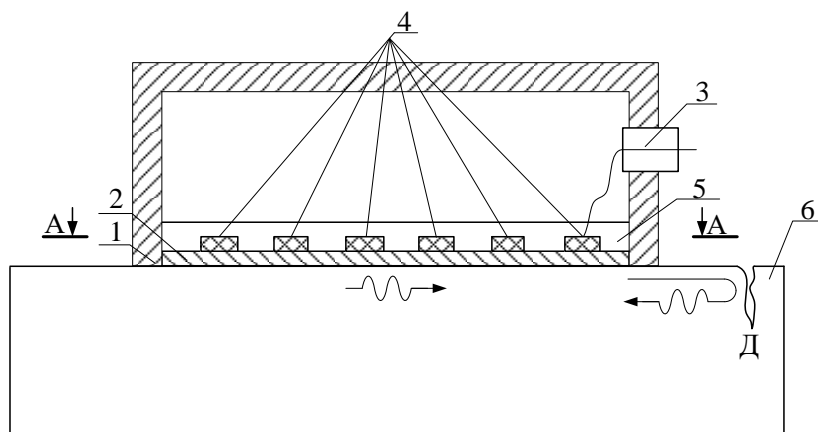


Рис. 5 – Схематичне зображення широкопугового ЄП для контролю електропровідних виробів імпульсами ультразвукових поверхневих хвиль та його розміщення на ОК

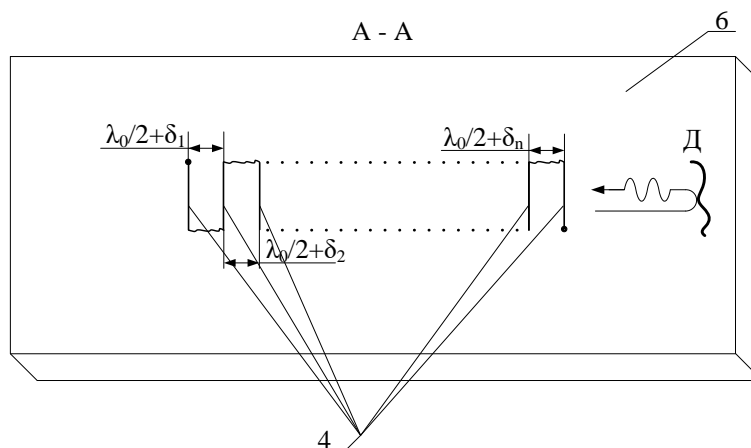


Рис. 6 – Схематичне зображення розташування на поверхні ОК полоскових електродів ЄП



ЄП працює наступним чином. ЄП, який має корпус 1, який розташовують над поверхнею ОК 6, як це зображено на рис. 5. Через з'єднувач 3 на полоскові електроди 4, що розміщені в неелектропровідній неферромагнітній основі, подається постійна і імпульсна напруги, які створюють в поверхневому шарі ОК 6 постійне і імпульсне електричне поле. Взаємодія цих полів приводить до збудження в поверхневому шарі ОК 6 імпульсів поверхневих ультразвукових хвиль, які поширюються вздовж поверхні ОК 6, як це показано стрілками на кресленнях. Найбільш потужним буде ультразвуковий імпульс, при якому напівдовжина збудженої ультразвукової хвилі буде рівною відстані між двома сусідніми полосковими електродами перетворювача. Якщо пружні властивості поверхні виробу зміняться із-за неоднорідності хімічного стану матеріалу, зміни температури, хвилястості поверхні тощо, то потужні імпульси поверхневих хвиль будуть збуджувати інші полоскові електроди. Таким чином перекривається весь діапазон можливих змін факторів, що можуть впливати на збудження імпульсів ультразвукових хвиль в виробках, близьких за властивостями. В результаті ефективність неруйнівного контролю підвищиться.

При реєстрації ультразвукових імпульсів відбитих від дефекту  $D$  реалізується аналогічний селективний процес. Завжди знайдеться пара сусідніх полоскових електродів, відстань між якими співпаде з напівдовжиною відбитої ультразвукової хвилі. Амплітуда прийнятого імпульсу збільшиться. Тобто, і при реєстрації поверхневих ультразвукових хвиль ефективність неруйнівного контролю підвищиться.

**Висновки.** Реалізація першого представленого на рис. 2, рис. 3 комбінованого ємнісного перетворювача для контролю імпульсами ультразвукових поверхневих хвиль дасть змогу підвищити чутливість до різниці характеристик металу вздовж його поверхні, що має суттєве значення при виготовленні виробів з використанням обробки тиском – прокатки, штампування тощо.

Особливості конструкції другого типу ємнісного перетворювача рис. 4 дають можливість мати високу захищеність від когерентних акустичних завад.

Третя розробка перетворювача (рис. 5, рис. 6) направлена на підвищення ефективності при дефектоскопії, що має суттєве значення при постачанні споживачам якісних виробів.

#### Список літератури

1. Денисов Л.С., Контроль и управление качеством сварочных работ : учеб. пособие / Л.С. Денисов - Минск : Выш. шк., 2016. - 619 с.
2. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. Под общ. ред. В.В. Клюева. Т.3: Ультразвуковой контроль / И.Н. Ермолов, Ю.В. Ланге. - М.: Машиностроение, 2006. - 864 с.
3. H. Carr, W.S.H. Munro, M. Rafiq and C. Wykes, 'Developments in capacitive transducers', *Nondest. Test. Eval.* 10, 3-14 (1992)
4. J. H. Cantrell, Jr. and M. A Breazeale, "Elimination of transducer bond corrections in accurate ultrasonic-wave velocity measurements by use of capacitive transducers," *J. Acoust Soc. Am.* 61, 403-405 (1977).

5. J. H. Cantrell, Jr. and M. A. Breazeale, "A capacitive driver for measurement of ultrasonic wave velocity in solids," *Proc. IEEE. Ultra. Symp., Cat. #74 CHO 596-1SU, 537-539* (1974).
6. E. I. Chem, J. H. Cantrell, Jr., and J. S. Heyman, "Improved formula for continuous-wave measurements of ultrasonic phase velocity," *J. Appl. Phys.* 52, 3200-3204 (1981).
7. J. H. Cantrell, Jr. and M. A. Breazeale, "Ultrasonic investigation of the nonlinearity of fused silica for different hydroxyl-ion contents and homogeneities between 300 and 3 °K," *Phys. Rev. B* 17(12), 4864-4870 (1978).
8. W. A. Aiello, C. R. Wolfe, and W. A. Little, "Simplified vibrating-reed technique for the measurement of the temperature dependence of Young's modulus of small samples," *Rev. Sci. Instrum.* 54(5), 594-596 (1983).
9. J. W. Brill, "Elastic anomalies at the charge density wave transition in TaS<sub>3</sub>," *Solid. St Commun* 41(12), 925-929 (1982).
10. D. W. Schindel, D. A. Hutchins, and S. Smith, "A study of materials at high temperature using miniaturized resonant tuning forks," *J. Acoust. Soc. Am.* 92, 2314(A) (1992).
11. B. Golding, "Thermal expansivity of RbMnF<sub>3</sub> near TN," *J. Appl. Phys.* 42(4), 1381-1382 (1971).
12. T. Tiedje, R. R. Haering, and W. N. Hardy, "The application of capacitive transducers to sound velocity measurements in TTF-TCNQ," *J. Acoust. Soc. Am.* 65, 1171-1181 (1979).
13. C. B. Scruby and H. N. G. Wadley, "A calibrated capacitance transducer for the detection of acoustic emission," *J. Phys. D: Appl. phys.* 11, 1487-1494 (1978).
14. F. R. Breckenridge, C. E. Tschiegg, and M. Greenspan, "Acoustic emission; some applications of Lamb's problem," *J. Acoust. Soc. Am.* 57(3), 626-631 (1975).
15. F. R. Breckenridge and M. Greenspan, "Surface-wave displacement: Absolute measurements using a capacitive transducer," *J. Acoust. Soc. Am.* 69, 1177-1185 (1981).
16. D. A. Hutchins and J. D. Macphail, "A new design of capacitance transducer for ultrasonic displacement detection," *J. Phys. E: Sci. Instrum.* 18, 69-73 (1985).
17. K. Y. Kira and W. Sachse, "Self-aligning capacitive transducer for the detection of broadband ultrasonic displacement signals," *Rev. Sci. Instrum.* 57(2), 264-267 (1986).
18. K. Y. Kim, L. Niu, B. Castagnede, and W. Sachse, "Miniaturized capacitive transducer for detection of broadband ultrasonic displacement signals," *Rev. Sci. Instrum.* 60(8), 2785-2788 (1989).
19. G. E. Sieger and H. W. Lefevre, "Time-resolved measurement of acoustic pulses generated by MeV protons stopping in aluminum," *Phys. Rev. A* 31(6), 3929-3936 (1985).
20. F. R. Breckenridge, T. M. Proctor, N. N. Hsu, S. E. Fide, and D. G. Eitzen, "Transient sources for acoustic emission work," *NIST internal report* (1990).
21. D. Legros and I. Lewiner, "Electrostatic ultrasonic transducers and their utilization with foil electrets," *J. Acoust. Soc. Am.* 53, 1663-1672 (1973).
22. D. Legros, J. Lewiner, and P. Biquard, "Generation of ultrasound by a dielectric transducer," *J. Acoust. Soc. Am.* 52(1, Pt. 2), 196-198 (1972).
23. D. W. Schindel and D. A. Hutchins, "A wideband capacitance transducer source," *Proc. Ultrason. Inter. Symp.* 589-593 (1989).
24. ГОСТ Р 55724-2013 Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Методы ультразвуковые Дата введения 2015-07-01 М.: Стандартинформ, 2014
25. ДСТУ ГОСТ 8.495:2009 ГСИ. Толщиномеры ультразвуковые контактные. Методы и средства поверки (ГОСТ 8.495-83).
26. Архипов В.И. О качестве образцов для ультразвуковых измерений / В.И. Архипов, А.И. Кондратьев // Дефектоскопия. - 1991. - № 10. - С. 41-48.
27. Кондратьев А.И. Прецизионные методы и средства измерения акустических величин твердых сред. В двух частях. - Хабаровск : Изд-во ДВГУПС. - 2006. - 152 с.
28. Кондратьев А. И. Измерение скорости распространения и коэффициента затухания продольных волн в тонких образцах / А. И. Кондратьев, А. А. Кондратьев, В. И. Римлянд, К. А. Драчѳ // Вестник ТОГУ. - 2013. № 4(31). - С. 17-24.
29. Кондратьев А.И. Емкостный широкополосный датчик сигналов акустической эмиссии / А.И. Кондратьев, В.А. Луговой // Акустическая эмиссия. Неразрушающий контроль : IV междунар. конф. : тезисы докл. - Москва, 1998 - С. 47.
30. Луговой В.А. Широкополосный емкостный приемник

акустических сигналов / В.А. Луговой // Сейсмоакустика переходных зон : материалы 3-го Всероссийского симпозиума. - Владивосток, 2003. - С.56-58.

31. Пат. RU 2137118, МПК G 01 N 27/22. Самокалибрующийся емкостной преобразователь / Кондратьев А.И., Римлянд В.И., Казарбин А.В.; заявитель и патентообладатель : Хабаровский государственный технический университет – № 97120210/28 ; заяв. 04.12.1997; опубл. 10.09.1999.
32. Пат. RU 2140072, МПК G 01 N 27/22. Способ контроля и стабилизации чувствительности емкостного преобразователя / Кондратьев А.И., Римлянд В.И., Казарбин А.В.; заявитель и патентообладатель : Хабаровский государственный технический университет – № 97120202/28 ; заяв. 04.12.1997; опубл. 20.10.1999.
33. Король, Андрей Александрович. Алгоритмическое и программное обеспечение измерительного комплекса для определения параметров распространения различных типов акустических волн в твердых средах : диссертация ... кандидата технических наук : 05.11.16 / Король Андрей Александрович; [Место защиты: Тихоокеан. гос. ун-т]. - Хабаровск, 2011.- 140 с.: ил. РГБ ОД, 61 11-5/2448.
34. M. Platte, 'PVDF ultrasonic transducers for ultrasonic testing', *Ferroelectrics* 115, 229-246 (1991)
35. M. Tone, T. Yano and A. Fukumoto, 'High-frequency ultrasonic transducer operating in air', *Japan. J. Appl. Phys.* 23, L436-L438 (1984)
36. C.M. Fortunko, R.E. Schramm, C.M. Teller, G.M. Light, J.D. McColskey, W.P. Dubé and M.C. Renken, 'Pulse-echo gas-coupled ultrasonic crack detection and thickness gaging', *Proc. Rev. Quant. Nondest. Eval. Vol. 14A and 14B, Ch. 312*, 951-958 (1995)
37. W. Manthey, N. Kroemer and V. Mágori, 'Ultrasonic transducers and transducer arrays for applications in air', *Meas. Sci. Technol.* 3, 249-261 (1992)
38. T.R. Gururaja, W.A. Schulze, L.E. Cross and R.E. Newnham, 'Piezoelectric composite materials for ultrasonic transducer applications. Part II: Evaluation of ultrasonic medical applications', *IEEE Trans. Son. Ultrason. SU* 32, 499-513 (1985)
39. Ноздрачева Е.Л. Особенности возбуждения ультразвуковых импульсов емкостным преобразователем / Ноздрачева Е.Л., Сучков Г.М., Петришев О.Н. // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: «Обчислювальна техніка та автоматизація». – Красноармійськ. – №1(28)2015. – С. 165-170.
11. B. Golding, "Thermal expansivity of RbMnF<sub>3</sub> near TN," *J. Appl. Phys.* 42(4), 1381-1382 (1971).
12. T. Tiedje, R. R. Haering, and W. N. Hardy, "The application of acoustic transducers to sound velocity measurements in TTF-TCNQ," *J. Acoust. Soc. Am.* 65, 1171-1181 (1979).
13. C B. Scruby and H. N. G. Wadley, "A calibrated capacitance transducer for the detection of acoustic emission," *J. Phys. D: Appl. phys.* 11, 1487-1494 (1978).
14. F. R. Breckenridge, C. E. Tschiegg, and M. Greenspan, "Acoustic emission; some applications of Lamb's problem," *J. Acoust. Soc. Am.* 57(3), 626-631 (1975).
15. F. R. Breckenridge and M. Greenspan, "Surface-wave displacement: Absolute measurements using a capacitive transducer," *J. Acoust. Soc. Am.* 69, 1177-1185 (1981).
16. D. A. Hutchins and J. D. Macphail, "A new design of capacitance transducer for ultrasonic displacement detection," *J. Phys. E: Sci. Instrum.* 18, 69-73 (1985).
17. K. Y. Kira and W. Sachse, "Self-aligning capacitive transducer for the detection of broadband ultrasonic displacement signals," *Rev. Sci. Instrum.* 57(2), 264-267 (1986).
18. K. Y. Kim, L. Niu, B. Castagnede, and W. Sachse, "Miniaturized capacitive transducer for detection of broadband ultrasonic displacement signals," *Rev. Sci. Instrum.* 60(8), 2785-2788 (1989).
19. G. E. Sieger and H. W. Lefevre, "Time-resolved measurement of acoustic pulses generated by MeV protons stopping in aluminum," *Phys. Rev. A* 31(6), 3929-3936 (1985).
20. F. R. Breckenridge, T. M. Proctor, N. N. Hsu, S. E. Fide, and D. G. Eitzen, "Transient sources for acoustic emission work," NIST internal report (1990).
21. D. Legros and I. Lewiner, "Electrostatic ultrasonic transducers and their utilization with foil electrets," *J. Acoust. Soc. Am.* 53, 1663-1672 (1973).
22. D. Legros, J. Lewiner, and P. Biquard, "Generation of ultrasound by a dielectric transducer," *J. Acoust. Soc. Am.* 52(1, Pt. 2), 196-198 (1972).
23. D. W. Schindel and D. A. Hutchins, "A wideband capacitance transducer source," *Proc. Ultrason. Inter. Symp.* 589-593 (1989).
24. GOST R 55724-2013 Kontrol' nerazrushayushchiy. Soyedineniya svarnyye. Metody ul'trazvukovyye Data vvedeniya 2015-07-01 Moscow: Standartinform, 2014.
25. DSTU GOST 8.495:2009 GSI. Tolshchinomery ul'trazvukovyye kontaktnyye. Metody i sredstva poverki (GOST 8.495-83)
26. 26 Arkhipov V.I. O kachestve obraztsov dlya ul'trazvukovykh izmereniy / V.I. Arkhipov, A.I. Kondrat'yev // Defektoskopiya. – 1991. – No 10. – P. 41-48.
27. Kondrat'yev A.I. Pretsizionnyye metody i sredstva izmereniya akusticheskikh velichin tverdykh sred. V dvukh chastyakh. – Khabarovsk : Izd-vo DVGUPS. – 2006. – 152 p.
28. Kondrat'yev A. I. Izmereniye skorosti rasprostraneniya i koeffitsiyenta zatukhaniya prodol'nykh voln v tonkikh obraztsakh / A. I. Kondrat'yev, A. A. Kondrat'yev, V. I. Rimlyand, K. A. Drachov // Vestnik TOGU. – 2013. No 4(31). – P. 17-24.
29. Kondrat'yev A.I. Yemkostnyy shirokopolosnyy datchik signalov akusticheskoy emissii / A.I. Kondrat'yev, V.A. Lugovoy // Akusticheskaya emissiya. Nerazrushayushchiy kontrol' : IV mezhdunar. konf. : tezisy dokl. – Moscow, 1998 – P. 47.
30. Lugovoy V.A. Shirokopolosnyy yemkostnyy priyemnik akusticheskikh signalov / V.A. Lugovoy // Seysmoakustika perekhodnykh zon : materialy 3-go Vserossiyskogo simpoziuma. - Vladivostok, 2003. - P.56-58.
31. Пат. RU 2137118, МПК G 01 N 27/22. Samokalibrnyushchiysya yemkostnoy preobrazovatel' / Kondrat'yev A.I., Rimlyand V.I., Kazarbin A.V.; yayavitel' i patentoobladatel' : Khabarovskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet – No 97120210/28 ; yayav. 04.12.1997; opubl. 10.09.1999.
32. Пат. RU 2140072, МПК G 01 N 27/22. Sposob kontrolya i stabilizatsii chuvstvitel'nosti yemkostnogo preobrazovatelya / Kondrat'yev A.I., Rimlyand V.I., Kazarbin A.V.; yayavitel' i patentoobladatel' : Khabarovskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet – No 97120202/28 ; yayav. 04.12.1997; opubl. 20.10.1999.
33. Korol', Andrey Aleksandrovich. Algoritmicheskoye i programnoye obespecheniye izmeritel'nogo kompleksa dlya opredeleniya parametrov rasprostraneniya razlichnykh tipov akusticheskikh voln v tverdykh sredakh : dissertatsiya ... kandidata tekhnicheskikh nauk : 05.11.16 / Korol' Andrey Aleksandrovich;

#### References (transliterated)

1. Denisov L. Kontrol' i upravleniye kachestvom svarochnykh rabot: ucheb. posobiye / L.S. Denisov - Minsk: Vysh. shk., 2016. - 619 p.
2. Nerazrushayushchiy kontrol': Spravochnik: V 7 t. Pod obshch. red. V.V. Klyuyeva. Vol. 3: Ul'trazvukovoy kontrol' / I.N. Yermolov, Yu.V. Lange. - Moscow: Mashinostroyeniye, 2006. - 864 p.
3. H. Carr, W.S.H. Munro, M. Rafiq and C. Wykes, 'Developments in capacitive transducers', *Nondest. Test. Eval.* 10, 3-14 (1992)
4. J. H. Cantrell, Jr. and M. A. Breazeale, "Elimination of transducer bond corrections in accurate ultrasonic-wave velocity measurements by use of capacitive transducers," *J. Acoust. Soc. Am.* 61, 403-405 (1977).
5. J. H. Cantrell, Jr. and M. A. Breazeale, "A capacitive driver for measurement of ultrasonic wave velocity in solids," *Proc. IEEE. Ultra. Symp., Cat. #74 CHO 596-1SU*, 537-539 (1974).
6. E. I. Chem, J. H. Cantrell, Jr., and J. S. Heyman, "Improved formula for continuous-wave measurements of ultrasonic phase velocity," *J. Appl. Phys.* 52, 3200-3204 (1981).
7. J. H. Cantrell, Jr. and M. A. Breazeale, "Ultrasonic investigation of the nonlinearity of fused silica for different hydroxyl-ion contents and homogeneities between 300 and 3 °K," *Phys. Rev. B* 17(12), 4864-4870 (1978).
8. W. A. Aiello, C. R. Wolfe, and W. A. Little, "Simplified vibrating-reed technique for the measurement of the temperature dependence of Young's modulus of small samples," *Rev. Sci. Instrum.* 54(5), 594-596 (1983).
9. J. W. Brill, "Elastic anomalies at the charge density wave transition in TaS<sub>3</sub>," *Solid. St Commun* 41(12), 925-929 (1982).
10. D. W. Schindel, D. A. Hutchins, and S. Smith, "A study of materials at high temperature using miniaturized resonant tuning forks," *J. Acoust. Soc. Am.* 92, 2314(A) (1992).

- [Mesto zashchity: Tikhookean. gos. un-t].- Khabarovsk, 2011.- 140 s.: il. RGB OD, 61 11-5/2448.
34. M. Platte, 'PVDF ultrasonic transducers for ultrasonic testing', *Ferroelectrics* 115, 229–246 (1991)
35. M. Tone, T. Yano and A. Fukumoto, 'High-frequency ultrasonic transducer operating in air', *Japan. J. Appl. Phys.* 23, L436-L438 (1984)
36. C.M. Fortunko, R.E. Schramm, C.M. Teller, G.M. Light, J.D. McColskey, W.P. Dubé and M.C. Renken, 'Pulse-echo gas-coupled ultrasonic crack detection and thickness gaging', *Proc. Rev. Quant. Nondest. Eval. Vol. 14A and 14B, Ch. 312*, 951–958 (1995)
37. W. Manthey, N. Kroemer and V. Mágori, 'Ultrasonic transducers and transducer arrays for applications in air', *Meas. Sci. Technol.* 3, 249–261 (1992)
38. T.R. Gururaja, W.A. Schulze, L.E. Cross and R.E. Newnham, 'Piezoelectric composite materials for ultrasonic transducer applications. Part II: Evaluation of ultrasonic medical applications', *IEEE Trans. Son. Ultrason. SU* 32, 499–513 (1985)
39. Nozdracheva Ye.L. Osobennosti vozбуzhdeniya ul'trazvukovykh impul'sov yemkostnym preobrazovatelem / Nozdracheva Ye.L., Suchkov G.M., Petrishchev A.N. // *Nauchnyye trudy Donetskogo natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya «Vychislitel'naya tekhnika i avtomatizatsiya»*. - Krasnoarmeysk. - No1 (28) '2015. - P. 165–170.

Надійшла (received) 30.11.2019

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

**Ноздрачова Катерина Леонідівна (Ноздрачева Екатерина Леонидовна, Nozdrachova Kateryna 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, Г. М. СУЧКОВ, С. Ю. ПЛЕСНЕЦОВ**

### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТИЧЕСКОГО РАДИУСА МЕСТА ИЗГИБА ПРИ ФОРМОВКЕ ГНУТЫХ ПРОФИЛЕЙ**

Возросшая потребность в качественных гнутых профилях из сталей различных марок свидетельствует о необходимости обеспечения правильной оценки прочностных и пластических свойств материала. Вопрос о разрушении материала в процессе профилирования, то есть в первую очередь о минимальных допустимых (критических) радиусах изгиба, решали, базируясь на показателях относительного удлинения материалов. В дальнейшем было доказано, что более правильным показателем пластичности материала следует считать относительное поперечное сужение. Исходя из указанной оценки пластичности разработаны методы определения минимально допустимых радиусов изгиба. Но, так как относительное поперечное сужение при одноосном растяжении не равно при двuosном растяжении (что имеет место на наружной поверхности места изгиба), необходимо ввести корректировочные коэффициенты. Методом механики сплошных сред с использованием поля скоростей перемещений определена удельная работа деформирования элементарного объема места изгиба при профилировании. Установлено, что удельная работа деформирования с уменьшением радиуса и увеличением угла изгиба возрастает. Исходя из сравнения удельной работы деформирования при изгибе с критической работой разрушения получен критический радиус разрушения, который с увеличением угла изгиба увеличивается. В работе установлено, что технологические радиусы мест изгиба должны отличаться от расчетных значений критического радиуса изгиба коэффициентом запаса прочности. Получена зависимость для определения критического радиуса мест изгиба при поштучном процессе профилирования, поскольку в этом случае имеют место наклеп и заусенцы на концах полосы.

**Ключевые слова:** процесс профилирования, показатель пластичности материала, относительное поперечное сужение, удельная работа деформирования, критическая работа разрушения, критический радиус места изгиба.

**Ю. О. ПЛЕСНЕЦОВ, Г. М. СУЧКОВ, С. Ю. ПЛЕСНЕЦОВ**

### **ВИЗНАЧЕННЯ КРИТИЧНОГО РАДІУСУ МІСЦЯ ЗГИНАННЯ ПРИ ФОРМУВАННІ ГНУТИХ ПРОФІЛІВ**

Зростаюча потреба в якісних гнутих профілях зі сталей різних марок свідчить про необхідність забезпечення правильної оцінки міцності і пластичних властивостей матеріалу. Питання про руйнування матеріалу в процесі профілювання, тобто в першу чергу про мінімальні допустимі (критичні) радіуси згинання, вирішували, базуючись на показниках відносного подовження матеріалів. В подальшому було доведено, що більш правильним показником пластичності матеріалу слід вважати відносне поперечне звуження. Виходячи із зазначеної оцінки пластичності розроблені методи визначення мініимально допустимих радіусів згинання. Але, так як відносне поперечне звуження при одноосовому розтягуванні не дорівнює при двохосовому розтягуванні (що має місце на зовнішній поверхні місця вигину), необхідно вводити коректуральні коефіцієнти. Методом механіки суцільних середовищ з використанням поля швидкостей переміщень визначена питома робота деформування елементарного об'єкту місця вигину при профілюванні. Встановлено, що питома робота деформування зі зменшенням радіусу і збільшенням кута вигину зростає. Виходячи з порівняння питомої роботи деформування при згинанні з критичною роботою руйнування отримано критичний радіус руйнування, який зі збільшенням кута згинання збільшується. У роботі встановлено, що технологічні радіуси місць вигину повинні відрізнятися від розрахункових значень критичного радіусу згинання коефіцієнтом запаса міцності. Отримано залежність для визначення критичного радіусу місць згинання при поштучному процесі профілювання, оскільки в цьому випадку мають місце наклеп і задирки на кінцях смуги.

**Ключові слова:** процес профілювання, показник пластичності матеріалу, відносне поперечне звуження, питома робота деформування, критична робота руйнування, критичний радіус місця згинання.

**Yu. A. PLESNETSOV, G. M. SUCHKOV, S. Yu. PLESNETSOV**

### **DETERMINATION OF CRITICAL RADIUS OF THE BEND WHEN FORMING BENT PROFILES**

The increased demand for high-quality bent profiles from steels of various grades indicates the need to ensure the correct assessment of the strength and plastic properties of the material. The issue of material destruction during the profiling process is defined by, first of all, the minimum allowable (critical) bending radii, based on the relative elongation of the materials. It was further proven that a relative transverse narrowing should be considered a more correct indicator of the plasticity of the material. Based on this plasticity estimate, methods have been developed for determining the minimum allowable bending radii. But, since the relative transverse narrowing in uniaxial tension is not equal to biaxial tension (which takes place on the outer surface of the bend), it is necessary to introduce correction factors. Using the method of continuum mechanics using the field of displacement velocities, the specific work of deformation of the elementary volume of the bending place during profiling was determined. It is established that the specific work of deformation increases with a decrease in radius and an increase in the bending angle. Based on a comparison of the specific work of deformation during bending with the critical work of fracture, a critical radius of fracture is obtained, which increases with increasing angle of bending. It was found in the work that the technological radii of the bending places should differ from the calculated values of the critical bending radius by the safety factor. A dependence is obtained for determining the critical radius of the bending places during the piecewise profiling process, since in this case there is hardening and burrs at the ends of the strip.

**Key words:** profiling process, plasticity index of material, relative transverse narrowing, work of deformation, critical work of fracture, critical radius of a bend.

**Введение.** Возросшая потребность в качественных профилях из сталей различных марок свидетельствует о необходимости обеспечения правильной оценки прочностных и пластических свойств материала.

**Актуальность работы.** Вопрос о разрушении материала в процессе профилирования, т.е. в первую очередь о минимальных допустимых (критических) радиусах изгиба, решали, базируясь на показателях относительного удлинения материалов  $\delta_{10}$ . В дальнейшем было доказано [1–7], что более

правильным показателем пластичности материала следует считать относительное поперечное сужение  $\psi_{ш}$ . Исходя из оценки пластичности по  $\psi_{ш}$  были разработаны [3–7] методы определения минимально допустимых радиусов изгиба. Но, так как  $\psi_{ш}$  при одноосном растяжении не равно при двuosном растяжении [3] (что имеет место на наружной поверхности места изгиба), необходимо ввести корректировочные коэффициенты.

**Цель и задачи исследования.** Необходимость учета влияния схемы напряженно-деформированного состояния путем определения дополнительных коэффициентов.

**Методика исследований.** В работе [3] показано, что критерием разрушения материалов может быть только величина, учитывающая накопление энергии в различных точках тела. Такой величиной является удельная работа деформирования единичного объема разрывного образца до разрушения. На основании условия пластичности Губера-Мизеса этот критерий можно распространить на различные схемы напряженно-деформированного состояния.

$$\vartheta_r = -\frac{\omega}{2\varphi_0} \left( r + \frac{\rho^2}{r} \right) - \frac{R_H(r^2 - R_B^2)\Delta S_{\max}}{2\rho r s_0} \cos^4 \frac{\pi\varphi}{2\varphi_0}; \quad (1)$$

$$\vartheta_\varphi = \omega \frac{\varphi}{\varphi_0} r + \frac{R_H r \Delta S_{\max}}{\rho s_0} \left( \frac{3}{8} \varphi + \frac{\varphi_0}{2\pi} \sin \frac{\pi\varphi}{\varphi_0} + \frac{\varphi_0}{16\pi} \sin \frac{2\pi\varphi}{\varphi_0} \right).$$

Выражение для интенсивности скоростей деформации имеет вид:

$$\varepsilon_i = \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{\left[ \frac{\omega}{\varphi_0} \left( 1 - \frac{\rho^2}{r^2} \right) + \frac{\Delta S_{\max} R_H}{\rho s_0} \left( 1 + \frac{R_B^2}{r^2} \right) \cos^4 \frac{\pi\varphi}{2\varphi_0} \right]^2 + \left[ \frac{4R_H \varphi_0 \Delta S_{\max} (r^2 - R_B^2)}{\rho s_0 \pi r^2} \cos^3 \frac{\pi\varphi}{2\varphi_0} \sin \frac{\pi\varphi}{2\varphi_0} \right]^2}, \quad (2)$$

где  $\vartheta_\varphi$  и  $\vartheta_r$  – проекции тангенциальной и радиальной составляющих скоростей перемещения частиц на соответствующие оси;

$\omega$  – угловая скорость поворота торца заготовок;

$\varphi, \varphi_0$  – текущая и конечная величина углов изгиба;

$R_H$  и  $R_B$  – наружный и внутренний радиус изгиба;

$r$  – текущая величина радиуса;

$\rho = \sqrt{R_H R_B}$  – радиус нейтрального слоя напряжений;

**Результаты исследований.** Для определения максимальных величин удельной работы деформирования элементарного объема (заготовки) при профилировании необходимо знать величины интенсивности скоростей деформаций  $\varepsilon_i$ , деформаций  $e_i$ , а также интенсивности напряжений  $\sigma_i$ .

Согласно [3], поле скоростей перемещений частиц при профилировании может быть описано уравнениями:

$S_0$  – толщина изгибаемой заготовки;

$\Delta S_{\max}$  – максимальная величина абсолютного уменьшения толщины (утонения) изогнутой заготовки;

$\varepsilon_i$  – интенсивность скоростей деформации.

При введении относительных величин, формула (2) примет вид:

$$\varepsilon_i = \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{\left[ \frac{\omega}{\varphi_0} \left( 1 - \frac{\rho_1^2}{\bar{r}^2} \right) + \frac{\eta r_H}{\rho_1} \left( 1 + \frac{r_B^2}{\bar{r}^2} \right) \cos^4 \frac{\pi\varphi}{2\varphi_0} \right]^2 + \left[ \frac{4r_H \varphi_0 \eta (\bar{r}^2 - r_B^2)}{\pi \rho_1 \bar{r}^2} \cos^3 \frac{\pi\varphi}{2\varphi_0} \sin \frac{\pi\varphi}{2\varphi_0} \right]^2}, \quad (3)$$

$$E = \varepsilon_i \sigma_i. \quad (4)$$

где  $r_H, r_B$  и  $r$  – относительные величины наружного, внутреннего и текущего радиусов;

$\eta = \frac{\Delta S_{\max}}{S_0}$  относительное утонение.

Подставляя в это уравнение значение  $\varepsilon_i$  из (3), получим:

Функция диссипации энергии  $E$  определяется выражением [3]:

$$E = \frac{1}{\sqrt{3}} \sigma_i \sqrt{\left[ \frac{\omega}{\varphi_0} \left( 1 - \frac{\rho_1^2}{\bar{r}^2} \right) + \frac{\eta r_H}{\rho_1} \left( 1 + \frac{r_B^2}{\bar{r}^2} \right) \cos^4 \frac{\pi\varphi}{2\varphi_0} \right]^2 + \left[ \frac{4r_H \varphi_0 \eta (\bar{r}^2 - r_B^2)}{\pi \rho_1 \bar{r}^2} \cos^3 \frac{\pi\varphi}{2\varphi_0} \sin \frac{\pi\varphi}{2\varphi_0} \right]^2}, \quad (5)$$

Из выражения (5) следует, что диссипация энергии достигает максимума на наружной и внутренней поверхностях места изгиба при  $\varphi=0$ .

Подставляя значение  $\varphi=0$  в (5), получим:

$$E = \frac{\sigma_i}{\sqrt{3}} \sqrt{\left[ \frac{\omega}{\varphi_0} \left( 1 - \frac{\rho_1^2}{\bar{r}^2} \right) + \frac{\eta r_H}{\rho_1} \left( 1 + \frac{r_B^2}{\bar{r}^2} \right) \right]^2}. \quad (6)$$

Согласно (9) при изгибе до относительного внутреннего радиуса  $r_B > 0,05$  разрушению раньше будут подвергаться волокна наружной поверхности места изгиба. Подставляя в (6) значение  $\bar{r} = r_H$  и относительный радиус нейтрального слоя напряжений  $\rho_1 = \sqrt{r_H r_B}$  получим выражение для диссипации энергии в наиболее опасной точке наружной поверхности:

$$E = \frac{\sigma_i}{\sqrt{3}} \left[ \frac{\omega}{\varphi_0} \left( 1 - \frac{r_b}{r_h} \right) + \frac{\eta \sqrt{r_h}}{\sqrt{r_b}} \left( 1 + \frac{r_b^2}{r_h^2} \right) \right]. \quad (7)$$

Максимальную удельную работу деформирования элементарного объема наружной поверхности места изгиба можно получить, проинтегрировав выражение (7) по времени:

$$A_{уд} = \int_0^+ \frac{\sigma_i}{\sqrt{3}} \left[ \frac{\omega}{\varphi_0} \left( 1 - \frac{r_b}{r_h} \right) + \frac{\eta \sqrt{r_h}}{\sqrt{r_b}} \left( 1 + \frac{r_b^2}{r_h^2} \right) \right] dt. \quad (8)$$

В этом выражении  $\sigma_i$ ,  $r_b$ ,  $r_h$  и  $\eta$  взаимосвязаны и зависят от времени  $t$ . Установить эту связь в простом виде и проинтегрировать выражение (8) в общем виде не представляется возможным. Поэтому для определения величины удельной работы деформирования был применен метод приближенного вычисления.

При определении деформаций на наружной и внутренней поверхностях места изгиба [3] весь процесс изгиба до относительного внутреннего радиуса  $r_b$  был разбит на  $n$  интервалов и определено среднее значение интенсивности скоростей деформаций  $\varepsilon_{i,ср}$ , действующей в данном интервале, и приращение деформаций за интервал.

Согласно (8) аппроксимацию кривых  $\sigma_i - \varepsilon_i$  производим степенной функцией. При этом на участке, где  $e \leq 0,4$ ,

$$\sigma_i = B_1 e_i^m, \quad (9)$$

на участке, где  $e \geq 0,4$ ,

$$\sigma_i = K + B_2 e_i^{m_1}, \quad (10)$$

где  $B_1$ ,  $B_2$ ,  $m$ ,  $m_1$  и  $K$  – константы материала.

Таблица 1 – Последовательность расчета удельной работы деформирования элементарного объема при изгибе полосы с углом  $\varphi_0 = \frac{\pi}{4}$  и относительным внутренним радиусом изгиба  $r_b = 1$  для стали Ст. 3сп

Определяемая величина	при $r_b$							
	250	100	50	25	10	5	2	1
$\varepsilon_i$ , 1/сек	0,536	0,536	0,523	0,505	0,458	0,472	0,5	0,49
$e_n$	0,002	0,005	0,0099	0,0194	0,0464	0,082	0,175	0,330
$\sigma_i$ , Мн/м <sup>2</sup>	188	211	273	288	388	443	530	610
$E$ , Мн/м <sup>2</sup> сек	0,101	0,113	0,143	0,145	0,178	0,209	0,265	0,299
$\Delta t$ , сек	$\frac{1}{233,2}$	$\frac{1}{233,2}$	$\frac{1}{93,6}$	$\frac{1}{46,8}$	$\frac{1}{23,4}$	0,088	0,224	0,366
$\Delta A$ , Мдж/м <sup>3</sup>	0,42	0,73	1,53	3,1	11,4	18,4	56	106
$A$ , Мдж/м <sup>8</sup>	0,42	1,15	2,68	5,78	17,2	35,6	91,6	197,6

По уравнению (12) определено приращение работы между двумя смежными положениями. По уравнению (13) определена суммарная работа, затрачиваемая на деформирование элементарного объема при изгибе с конечным относительным внутренним радиусом  $r_b$  и углом изгиба  $\varphi_0$ .

Аналогично определена максимальная удельная работа деформирования элементарного объема при изгибе полосы с углом  $\varphi_0 = \frac{\pi}{4}$  и различными относительными внутренними радиусами изгиба.

Таким образом, средняя величина диссипации энергии в каждом интервале будет:

$$E_{ср} = \varepsilon_{i,ср} \cdot \sigma_i. \quad (11)$$

Приращение работы деформирования за интервал получим, умножив диссипацию энергии на время деформирования:

$$\Delta A = E_{ср} \Delta t. \quad (12)$$

Суммарную работу, затрачиваемую на деформирование элементарного объема при изгибе полосы в валках профилигибочных станков до относительного внутреннего радиуса изгиба  $r_b$ , получим, просуммировав приращения работы в отдельных интервалах:

$$A_{сум} = \sum \Delta A. \quad (13)$$

Пример определения величины удельной работы деформирования элементарного объема при изгибе полосы с углом  $\varphi_0 = \frac{\pi}{4}$  и относительным внутренним радиусом изгиба  $r_b = 1$  для стали Ст. 3сп приведены в табл. 1. Как и при определении деформаций, зафиксированы промежуточные положения при  $r_b$ , равном 250, 100, 50 и т.д. с соответствующими углами изгиба. Поскольку скорости перемещения частиц при профилировании относительно малы, можно принять  $\omega = 1$ . Тогда, из соотношения

$$\omega = \frac{\Delta \varphi}{\Delta t}. \quad (14)$$

получим:  $\Delta \varphi = \Delta t$ .

Величины максимальной удельной работы деформирования в зависимости от относительного внутреннего радиуса изгиба для сталей Ст. 3сп и 09Г2 приведены в табл. 2. По данным табл. 2 построен график изменения удельной работы деформирования элементарного объема в зависимости от относительного внутреннего радиуса изгиба (рис. 1). На этом же графике в виде прямых линий нанесены величины удельной работы разрушения для сталей марок Ст.3сп (1) и 09Г2 (2). Пересечение кривой зависимости удельной работы деформирования от относительного внутреннего радиуса изгиба с прямой критической работы разрушения дает критическое значение относительного внутреннего радиуса изгиба.

Таблица 2 – Максимальная удельная работа деформирования

Марка стали	Значение удельной работы деформирования $A$ , Мдж/м <sup>3</sup> , при $r_b$				
	0,1	0,25	0,5	1	2
Ст. 3сп	688	462	286	198	109
Сталь 09Г2	737	490	311	203	113

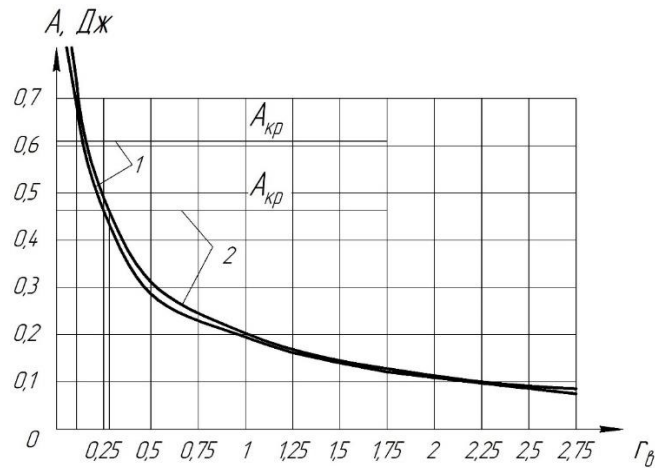


Рис. 1 – Зависимость удельной работы деформирования от относительного внутреннего радиуса изгиба: 1 – для стали Ст.3сп; 2 – для стали 09Г2

Из выражения (7) следует, что удельная работа деформирования зависит не только от радиуса, но и от угла изгиба.

Зависимость удельной работы деформирования от относительного внутреннего радиуса изгиба для угла изгиба  $\varphi_0 = \frac{\pi}{4}$  приведена в табл. 2.

Аналогичные результаты получены для различных значений угла  $\varphi_0$ , в соответствии с которыми, построены графики (рис. 2 и рис. 3).

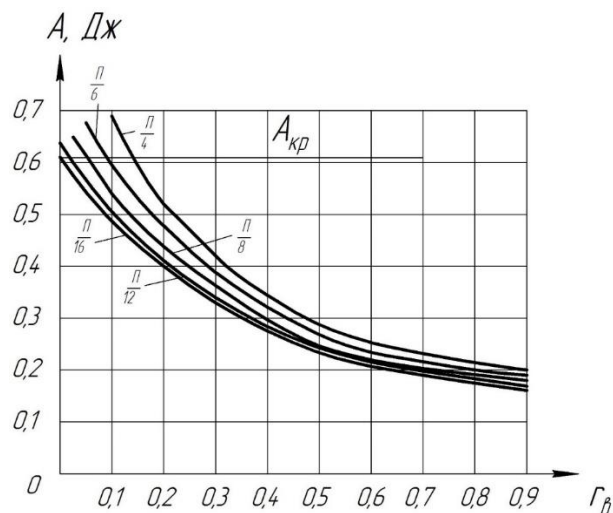


Рис. 2 – Кривые изменения удельной работы деформирования для стали Ст. 3сп при различных значениях углов изгиба

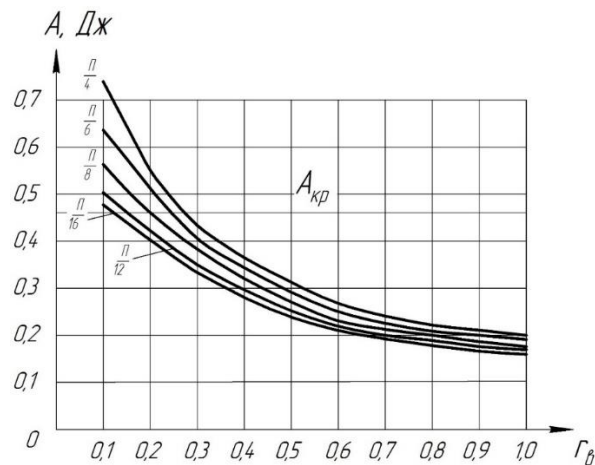


Рис. 3 – Кривые изменения удельной работы деформирования для стали 09Г2 при различных значениях углов изгиба

Из рис. 2 и рис. 3 следует, что с уменьшением угла изгиба удельная работа деформирования уменьшается. Пересечение кривых, соответствующих различным значениям угла  $\varphi_0$ , с прямыми критической удельной работы разрушения дает значения критических радиусов для различных углов подгибки заготовки.

В соответствии с полученными данными построен график изменения критического радиуса разрушения в зависимости от угла места изгиба для различных марок стали. График для стали марок

Ст. 3сп и 09Г2 приведен на рис. 4. Так как все расчеты приведены в относительных величинах, радиус в конкретных случаях изгиба необходимо определять следующим образом: по заданному углу изгиба на готовом профиле с помощью графика рис. 4 можно определить критические радиусы разрушения. Так, для рядовых сталей, представителем которых является Ст. 3сп, при изгибе на  $90^\circ$   $r_k=0,16$ , для низколегированных сталей (09Г2) при тех же условиях  $r_k=0,27$ .

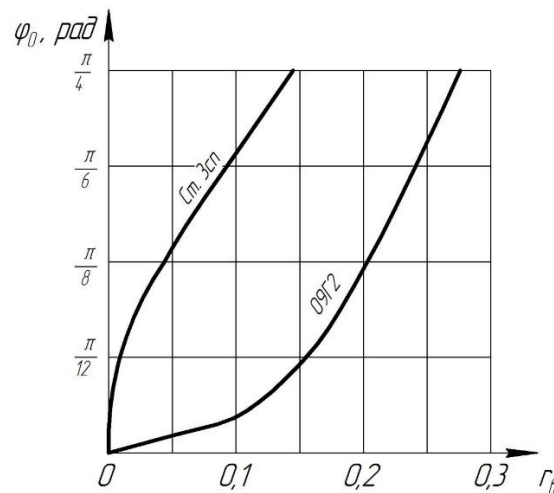


Рис. 4 – Зависимость критического радиуса разрушения от угла изгиба

Технологические радиусы изгиба отличаются от расчетных значений коэффициентом запаса прочности. Следовательно, при непрерывном процессе профилирования минимальный допустимый радиус изгиба должен определяться по зависимости

$$r_{\min} = k \cdot r_k. \quad (15)$$

Из графика (рис. 4) видно, что при малых величинах радиусов незначительное уменьшение радиуса изгиба вызывает резкое повышение удельной работы деформирования. При коэффициенте запаса прочности, равном 2, удельная работа деформирования будет значительно меньше

критической работы разрушения и будет гарантировано получение профилей без трещин.

Принимая  $k=2$ , при изгибе на  $90^\circ$  для непрерывного процесса профилирования соответственно получим минимальные допустимые радиусы изгиба:

- для рядовых сталей  $r_{\min} = 2 \cdot 0,16 = 0,32$ ;
- для низколегированных сталей  $r_{\min} = 2 \cdot 0,27 = 0,54$ .

При поштучном процессе профилирования в результате разрезки ленты перед станом концы полосы получают наклепанными. Кроме того, на них могут образовываться заусенцы, которые на



переднем конце получают на наружной поверхности профиля. Все это ужесточает условия деформирования концов полосы.

Эксперименты показывают, что минимальный допустимый радиус изгиба для наклепанного металла должен быть в 1,7÷2 раза больше, чем для отожженного. Изгиб заусенцами наружу также требует увеличения минимального радиуса изгиба в 1,65÷1,75 раза.

Таким образом, для поштучного процесса профилирования необходимо принимать

$$r_{\min} = (2,8 \div 3,5)kr_k. \quad (16)$$

При изгибе с углом  $\varphi_0 = \frac{\pi}{4}$  радиусы соответственно будут:

– для рядовых сталей  $r_{\min} = 0,9 \div 1,1$ ;

– для низколегированных сталей  $r_{\min} = 1,5 \div 1,9$ .

#### Выводы:

1. Методом механики сплошных сред с использованием поля скоростей перемещений определена удельная работа деформирования элементарного объема места изгиба при профилировании.

2. Установлено, что удельная работа деформирования с уменьшением радиуса и увеличением угла изгиба возрастает.

3. Из сравнения удельной работы деформирования при изгибе с критической работой разрушения получен критический радиус разрушения  $r_k$ , который при изгибе на угол  $\varphi_0 = \frac{\pi}{4}$  соответственно равен: для стали Ст. 3сп  $r_k=0,16$ , для стали 09Г2  $r_k=0,27$ . С увеличением угла изгиба величина критического радиуса также увеличивается.

4. Технологические радиусы изгиба должны отличаться от расчетных значений критического радиуса изгиба коэффициентом запаса прочности, т.е.

$$r_{\min} = kr_k.$$

5. При поштучном профилировании, когда имеют место наклеп и заусенцы на концах полосы,

относительный минимальный внутренний радиус изгиба следует определять по формуле:

$$r_{\min} = (2,8 \div 3,5)kr_k.$$

#### Список литературы

1. 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.
2. Тришевский И.С. Производство гнутых профилей. Оборудование и технологии. / И.С. Тришевский, А.Б. Юрченко, В.С. Марьян и др. – Москва: Металлургия, 1982. – 384 с.
3. Тришевский И.С., Докторов М.Е. Теоретические основы процесса профилирования. – Москва: Металлургия, 1980. – 288 с.
4. Тришевский И.С. Гнутые профили проката. Справочник / И.С. Тришевский, В.И. Мирошниченко, В.П. Стукалов и др. – Москва: Металлургия, 1980. – 352 с.
5. Тришевский И.С. Производство деталей из гнутых профилей / И.С. Тришевский, В.С. Марьян, В.А. Хмель. – Киев: Техника, 1985. – 128 с.
6. Roll forming handbook / Edited by George T. Halmos. – Boca Raton, London, New York: Taylor & Francis Group, 2006. – 573 p.
7. Филимонов С.В. Интенсивное формообразование гнутых профилей / С.В. Филимонов, В.И. Филимонов. – Ульяновск: УлГТУ, 2008. – 444 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. – Moscow: Metallurgiya, 1982. – 384 p.
3. Trishevskij I.S., Doktorov M.E. Teoreticheskie osnovy processa profilirovaniya. – Moscow: Metallurgiya, 1980. – 288 s.
4. Trishevskij I.S. Gnutye profili prokata. Spravochnik / I.S. Trishevskij, V.I. Miroshnichenko, V.P. Stukalov i dr. – Moscow: Metallurgiya, 1980. – 352 s.
5. Trishevskij I.S. Proizvodstvo detalej iz gnutyh profilej / I.S. Trishevskij, V.S. Marin, V.A. Hmel. – Kiev: Tehnika, 1985. – 128 p.
6. Roll forming handbook / Edited by George T. Halmos. – Boca Raton, London, New York: Taylor & Francis Group, 2006. – 573 p.
7. Filimonov S.V. Intensivnoe formoobrazovanie gnutyh profilej / S.V. Filimonov, V.I. Filimonov. – Ulyanovsk: UlGTU, 2008. – 444 p.

Поступила (received) 11.12.2019

#### 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 діагностики», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна, e-mail: plesnetsov@gmail.com.

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

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

**В. И. ПОЛЯНСКИЙ****ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПУТЕЙ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ**

Произведен расчет параметров теплового процесса при шлифовании и на его основе определены условия уменьшения температуры резания. Показано, что температура резания уменьшается по мере уменьшения доли тепла, возникающего при резании и уходящего в образующиеся стружки, и соответственно, увеличения доли тепла, уходящего в обрабатываемую деталь. При этом уменьшается глубина проникновения тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали. Установлено, что чем меньше условное напряжение резания, тем меньше температура резания. Этим доказана эффективность применения на финишных операциях вместо шлифования прогрессивных методов лезвийной обработки, характеризующихся меньшими значениями условного напряжения резания. Теоретически обоснована эффективность применения прерывистого шлифования. В этом случае уменьшение температуры резания происходит за счет уменьшения времени контакта рабочего выступа прерывистого круга с обрабатываемой деталью и за счет уменьшения условного напряжения резания вследствие работы круга в режиме интенсивного самозатачивания. Такой двойной эффект обработки фактически достигается лишь при прерывистом шлифовании, что является чрезвычайно важным фактором повышения качества и производительности обработки.

**Ключевые слова:** шлифование, лезвийная обработка, температура резания, тепловой баланс, прерывистый круг, условное напряжение резания.

**В. І. ПОЛЯНСЬКИЙ****ТЕОРЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ ШЛЯХІВ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ТА ПРОДУКТИВНОСТІ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ**

Виконано розрахунок параметрів теплового процесу при шліфуванні і на його основі визначено умови зменшення температури різання. Показано, що температура різання зменшується в міру зменшення частки тепла, що виникає при різанні і надходить в стружки, що утворюються, і відповідно, збільшення частки тепла, що надходить в оброблювану деталь. При цьому зменшується глибина проникнення тепла в поверхневий шар оброблюваної деталі. Встановлено, що чим менше умовне напруження різання, тим менше температура різання. Цим доведено ефективність застосування на фінішних операціях замість шліфування прогресивних методів лезової обробки, яка характеризується меншими значеннями умовного напруження різання. Теоретично обґрунтовано ефективність застосування переривчастого шліфування. У цьому випадку зменшення температури різання відбувається за рахунок зменшення часу контакту робочого виступу переривчастого круга з оброблюваною деталлю і за рахунок зменшення умовного напруження різання внаслідок роботи круга в режимі інтенсивного самозаточування. Такий подвійний ефект обробки фактично досягається лише при переривчастому шліфуванні, що є надзвичайно важливим фактором підвищення якості та продуктивності обробки.

**Ключові слова:** шліфування, лезова обробка, температура різання, тепловий баланс, переривчастий круг, умовне напруження різання.

**V. I. POLYANSKIY****THEORETICAL ANALYSIS OF WAYS TO IMPROVE QUALITY AND PRODUCTIVITY OF MACHINING**

The parameters of the thermal process during grinding are calculated and the conditions for reducing the cutting temperature are determined on its basis. It is shown that the cutting temperature decreases as the proportion of heat arising during cutting and leaving in the generated chips decreases, and accordingly, the proportion of heat leaving in the workpiece increases. This reduces the depth of penetration of heat into the surface layer of the workpiece. It was found that the smaller the conditional cutting voltage, the lower the cutting temperature. This proves the effectiveness of the application in finishing operations instead of grinding progressive methods of blade processing, characterized by lower values of the conditional cutting voltage. Theoretically substantiated the effectiveness of intermittent grinding. In this case, a decrease in cutting temperature occurs due to a decrease in the contact time of the working protrusion of the discontinuous circle with the workpiece and due to a decrease in the conditional cutting voltage due to the operation of the wheel in the intensive self-sharpening mode. Such a double treatment effect is actually achieved only with intermittent grinding, which is an extremely important factor in improving the quality and productivity of processing.

**Keywords:** grinding, blade processing, cutting temperature, heat balance, intermittent circle, conditional cutting voltage.

**Введение.** Современное машиностроительное производство требует обеспечения высоких показателей качества и производительности механической обработки на финишных операциях изготовления деталей машин. Традиционно это достигается применением прогрессивных методов шлифования, отличающихся в первую очередь высокой режущей способностью шлифовального круга и его высокой износостойкостью. Однако, как показывает практика, уменьшить силовую и тепловую напряженность процесса шлифования весьма сложно в силу интенсивного трения связки круга с обрабатываемым материалом. Поэтому возможности повышения качества и производительности обработки при шлифовании достаточно ограничены. Это требует изыскания новых путей решения данной задачи и, прежде всего, на основе теоретического обоснования условий уменьшения температуры резания при шлифовании и лезвийной обработки. В связи с этим,

настоящая работа посвящена теоретическому анализу условий уменьшения температуры резания, как основного фактора повышения качества и производительности обработки.

**Анализ последних исследований и публикаций.** основополагающие теоретические решения повышения качества и производительности механической обработки приведены в работах [1–4]. Показано, что добиться уменьшения температуры резания при шлифовании можно различными путями, и предлагается в качестве наиболее эффективного метода прерывистого шлифования. Однако при этом не приведен сравнительный анализ условий уменьшения температуры резания при шлифовании и лезвийной обработке. Не показано, каким путем можно изменять количество тепла, выделяющегося при резании и

уходящего в обрабатываемую деталь и образующиеся стружки, и на этой основе добиваться уменьшения температуры резания и повышения качества и производительности механической обработки. Поэтому в настоящей работе поставлена задача: провести такой теоретический анализ и на его основе выявить основные направления уменьшения температуры резания и повышения качества и производительности механической обработки.

**Цель работы** – математическое описание параметров теплового процесса при механической обработке и теоретическое обоснование условий уменьшения температуры резания.

**Изложение основного материала.** В работе [5] приведено дифференциальное уравнение теплового баланса при шлифовании прямолинейного стержня со скоростью  $V_{рез}$  и его решение, полученные на основе раздельного учета количества тепла, возникающего при резании и уходящего в образующиеся стружки и обрабатываемую деталь:

$$c \cdot \rho \cdot S \cdot V_{рез} \cdot \theta + \frac{\lambda \cdot c \cdot \rho \cdot S^2}{N} \cdot \theta \cdot \frac{d\theta}{d\tau} = N, \quad (1)$$

$$\left(1 - \frac{\theta}{\theta_{max}}\right) \cdot e^{\frac{\theta}{\theta_{max}}} = e^{-\frac{V_{рез}^2 \cdot \tau}{a}}, \quad (2)$$

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

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

$S$  – площадь поперечного сечения стержня, м<sup>2</sup>;

$V_{рез}$  – скорость перерезания стержня, м/с;

$\theta$  – температура резания, градус;

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

$N = q \cdot S = \sigma \cdot V_{рез} \cdot S$  – мощность шлифования, Вт;

$q = \sigma \cdot V_{рез}$  – плотность теплового потока, Вт/м<sup>2</sup>;

$\sigma$  – условное напряжение резания, Н/м<sup>2</sup>;

$\tau$  – время обработки, с;

$a = \lambda / (c \cdot \rho)$  – коэффициент температуропроводности материала, м<sup>2</sup>/с;

$\theta_{max} = \sigma / (c \cdot \rho)$  – максимальная температура резания, град.

В табл. 1 приведены рассчитанные по зависимости (2) значения времени  $\tau$  для заданных значений отношения  $\theta / \theta_{max}$  и исходных данных (при шлифовании стали ШХ15):  $V_{рез} = 3,33 \cdot 10^{-3}$  м/с;  $a = 8,4 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с.

На рис. 1 приведены значения отношения  $\theta / \theta_{max}$  в зависимости от расчетных значений времени  $\tau$  (табл. 1). Исходя из рис. 1, с течением времени  $\tau$  отношение  $\theta / \theta_{max}$  непрерывно увеличивается, асимптотически приближаясь к единице. Соответственно увеличивается и температура резания.

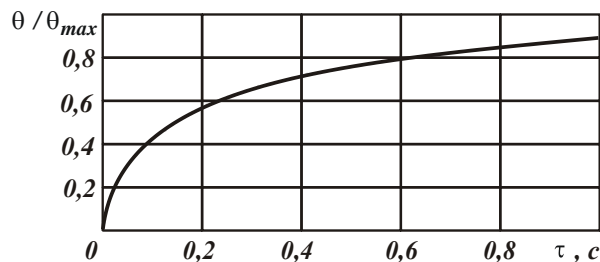


Рис. 1 – Зависимость отношения  $\theta / \theta_{max}$  от времени  $\tau$

Уравнение (1) после преобразований принимает вид:

$$\frac{\theta}{\theta_{max}} + \frac{\lambda}{\theta_{max} \cdot V_{рез}^2} \cdot \frac{\theta}{\theta_{max}} \cdot \frac{d\theta}{d\tau} = 1. \quad (3)$$

Из уравнения (3) вытекает, что доля тепла, уходящего в образующиеся стружки и определяемая первым слагаемым, равна  $\theta / \theta_{max}$ . Соответственно, доля тепла, уходящего в обрабатываемую деталь и определяемая вторым слагаемым, равна  $(1 - \theta / \theta_{max})$ . Поэтому, согласно рис. 1, с увеличением времени  $\tau$  и отношения  $\theta / \theta_{max}$  увеличивается доля тепла, уходящего в образующиеся стружки, а доля тепла, уходящего в обрабатываемую деталь, наоборот, уменьшается, неограниченно приближаясь к нулю.

При плоском и круглом наружном (внутреннем) шлифовании время  $\tau$  принимает конечные значения, определяемые глубиной шлифования  $t = V_{рез} \cdot \tau$ .

Соответственно выражение  $A = V_{рез}^2 \cdot \tau / a$  с учетом

$V_{рез} = V_{дет} \cdot (t / D_{кр})^{0,5}$  принимает вид:

$$A = \frac{V_{дет} \cdot t}{a} \cdot \sqrt{\frac{t}{D_{кр}}}, \quad (4)$$

где  $V_{дет}$  – скорость детали, м/с;

$D_{кр}$  – диаметр круга, м.

Тогда зависимость (2) видоизменится:

$$\left(1 - \frac{\theta}{\theta_{max}}\right) \cdot e^{\frac{\theta}{\theta_{max}}} = e^{-\frac{V_{дет} \cdot t}{a} \cdot \sqrt{\frac{t}{D_{кр}}}}. \quad (5)$$

В табл. 1 приведены расчетные значения глубины шлифования  $t$ , полученные на основе преобразованной зависимости (4):

$$t = 3 \sqrt{\left(\frac{A \cdot a}{V_{дет}}\right)^2 \cdot D_{кр}} \quad (6)$$

для исходных данных:  $a = 8,4 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с;  $D_{кр} = 0,4$  м.

Как видно, с увеличением отношения  $\theta / \theta_{max}$  величина  $A$ ,  $a$ , соответственно, и глубина шлифования  $t$  (для заданного значения скорости детали  $V_{дет}$ ) увеличиваются. Следовательно,

увеличивается доля тепла, уходящего в образующиеся стружки, и уменьшается доля тепла, уходящего в обрабатываемую деталь. Наиболее полно эта закономерность реализуется при глубинном шлифовании ( $V_{\text{дем}}=0,01$  м/с). При многопроходном шлифовании ( $V_{\text{дем}}=0,25$  м/с) фактически невозможно реализовать увеличенные значения глубины

шлифования  $t$ , начиная от значения  $t=0,057$  мм, когда отношение  $\theta/\theta_{\text{max}}=0,2$ , поскольку удельная производительность обработки  $Q_{\text{уд}}=V_{\text{дем}} \cdot t$  (в мм<sup>2</sup>/мин) принимает весьма большие значения.

Таблица 1 – Расчетные значения параметров теплового процесса при шлифовании

$\theta/\theta_{\text{max}}$	0	0,2	0,4	0,6	0,8	0,9	1
$e^{\theta/\theta_{\text{max}}}$	1	1,2214	1,4918	1,8221	2,2255	2,4596	2,7183
$\left(1 - \frac{\theta}{\theta_{\text{max}}}\right) \cdot e^{\frac{\theta}{\theta_{\text{max}}}}$	1	0,9771	0,8951	0,7288	0,4451	0,24596	0
$A = \frac{V_{\text{рез}}^2}{a} \cdot \tau$	0	0,02	0,11	0,32	0,81	1,4	$\infty$
$\tau, \text{с}$	0	0,01515	0,0833	0,2424	0,6136	1,06	$\infty$
$V_{\text{дем}}=15$ м/мин = 0,25 м/с							
$t, \text{мм}$	0	0,056	0,176	0,36	0,665	0,96	$\infty$
$Q_{\text{уд}}, \text{мм}^2/\text{мин}$	0	855	2625	5400	9975	14400	$\infty$
$l_2/t$	–	10	3,63	1,875	0,99	0,64	0
$l_2, \text{мм}$	–	0,56	0,639	0,675	0,658	0,6144	–
$t+l_2, \text{мм}$	–	0,616	0,815	1,11	1,33	1,574	–
$V_{\text{дем}}=0,6$ м/мин = 0,01 м/с							
$t, \text{мм}$	0	0,167	0,513	1,055	1,948	2,813	$\infty$
$Q_{\text{уд}}, \text{мм}^2/\text{мин}$	0	100,2	307,8	633	1168,8	1687	$\infty$

Поэтому при многопроходном шлифовании основная часть выделяющегося при резании тепла уходит в обрабатываемую деталь, что имеет место на практике [5]. При глубинном шлифовании появляется возможность уменьшить долю тепла, уходящего в обрабатываемую деталь, фактически без уменьшения производительности обработки.

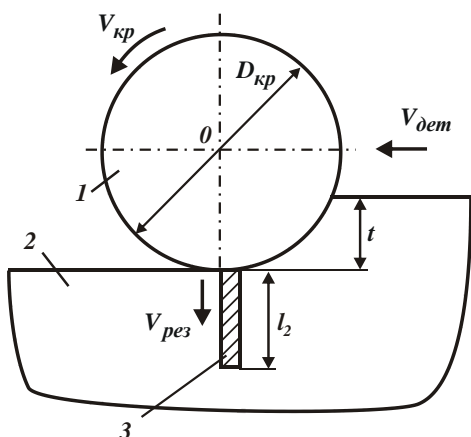


Рис. 2 – Расчетная схема параметров теплового процесса при плоском шлифовании:  
1 – шлифовальный круг; 2 – обрабатываемый материал; 3 – адиабатический стержень

Для раскрытия физической сущности установленных закономерностей следует оценить изменение отношения  $l_2/t$ , где  $l_2$  – глубина проникновения тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали, м (рис. 2 [6]). С физической точки зрения с увеличением времени обработки  $\tau$  и, соответственно, отношения  $\theta/\theta_{\text{max}}$ , отношение  $l_2/t$  должно уменьшиться. Это связано с уменьшением доли тепла, уходящего в обрабатываемую деталь, и увеличением доли тепла, уходящего в образующиеся стружки.

Для анализа данной закономерности следует воспользоваться зависимостью [2]:

$$\theta = \frac{q \cdot l_2}{\lambda}, \quad (7)$$

разрешая ее относительно величины  $l_2$ :

$$l_2 = \frac{\lambda \cdot \theta}{q} = \frac{\lambda \cdot \theta}{\sigma \cdot V_{\text{рез}}} = \frac{a}{V_{\text{рез}}} \cdot \frac{\theta}{\theta_{\text{max}}}. \quad (8)$$

С учетом выражений  $A = V_{\text{рез}}^2 \cdot \tau / a$  и  $\tau = t / V_{\text{рез}}$  зависимость (8) примет вид:

$$l_2 = \frac{t}{A} \cdot \frac{\theta}{\theta_{\text{max}}}. \quad (9)$$

В табл. 1 приведены количественные значения безразмерного параметра  $A$  и рассчитанные по зависимости (9) значения отношения  $l_2/t$  и  $l_2$  для случая  $V_{dem}=0,25$  м/с. Как видно, с увеличением отношения  $\theta/\theta_{max}$  отношение  $l_2/t$  непрерывно уменьшается. Это указывает на уменьшение доли тепла, уходящего в обрабатываемую деталь, и увеличение доли тепла, уходящего в образующиеся стружки.

Величина  $l_2$  с увеличением отношения  $\theta/\theta_{max}$  первоначально увеличивается, а затем несколько уменьшается (при чрезвычайно высоких значениях удельной производительности обработки  $Q_{yd}=V_{dem} \cdot t$ , не реализуемых в реальных условиях обработки). Поэтому следует рассматривать увеличение величины  $l_2$  с увеличением отношения  $\theta/\theta_{max}$ . При этом сумма величин однозначно  $t+l_2$  увеличивается с увеличением отношения  $\theta/\theta_{max}$ , что согласуется с преобразованной зависимостью (2) с учетом зависимости (7):

$$\theta = \theta_{max} \cdot \left[ 1 - e^{-\frac{V_{рез} \cdot (t+l_2)}{a}} \right]. \quad (10)$$

Из зависимости (10) вытекает, что чем больше сумма величин  $t+l_2$ , тем больше отношение  $\theta/\theta_{max}$  и, соответственно, больше температура резания  $\theta$ . Следовательно, чем больше объем нагретого материала при обработке, определяемого суммой величин  $t+l_2$ , тем больше температура резания  $\theta$ .

Таким образом показано, что оценку распределения тепла, уходящего в обрабатываемую деталь и образующиеся стружки, можно производить на основе отношения  $\theta/\theta_{max}$  [6]. Зная его, можно более полно определить параметры теплового процесса при шлифовании, да и других методов механической обработки, поскольку зависимости (2) и (10) справедливы для всего многообразия методов механической обработки.

Например, при точении скорость  $V_{рез}$  значительно больше, чем при шлифовании. Поэтому будет больше параметр  $A = V_{рез} \cdot a_{срез} / a$  (где  $a_{срез}$  – толщина среза, м), и соответственно больше отношение  $\theta/\theta_{max}$ , которое будет стремиться к единице. Однако при точении, как известно [2], меньше условное напряжение резания  $\sigma$ . Следовательно, будет меньше максимальная температура резания  $\theta_{max} = \sigma / (c \cdot \rho)$  и, соответственно, температура резания  $\theta$ , исходя из постоянства отношения  $\theta/\theta_{max}$ . Из этого вытекает, что при точении может быть меньше интенсивность теплового воздействия на поверхностный слой обрабатываемой детали. В результате будет обеспечиваться более высокое качество обрабатываемой поверхности, что подтверждается практическим опытом. Этим объясняется тот факт,

что на финишных операциях все чаще вместо процесса шлифования применяются прогрессивные методы лезвийной обработки (точение и фрезерование) с целью уменьшения температуры резания. Особенно эффективно применение высокоскоростного резания, обеспечивающего уменьшение температуры резания за счет уменьшения условного напряжения резания  $\sigma$ .

Кроме того, выполнение условия  $\theta/\theta_{max} \rightarrow 1$ , исходя из рис. 1, указывает на возможность дальнейшего увеличения скорости резания фактически без увеличения температуры резания. Это чрезвычайно важный резерв повышения производительности обработки при одновременном обеспечении высокого качества поверхностного слоя обрабатываемой детали. При шлифовании такой эффект обработки реализовать сложно из-за высоких значений условного напряжения резания  $\sigma$ , которые обусловлены интенсивным трением связки круга с обрабатываемым материалом. Поэтому применение различных технологических средств, способствующих снижению интенсивности трения в зоне шлифования, позволяет уменьшить условное напряжение резания  $\sigma$  и соответственно температуру резания  $\theta$  при одновременном повышении качества и производительности обработки. Одним из эффективных методов снижения тепловой и силовой напряженности процесса резания следует рассматривать метод прерывистого шлифования [1].

При прерывистом шлифовании, т.е. при шлифовании кругом с прерывистой рабочей поверхностью, время  $\tau = t/V_{рез}$  необходимо рассматривать в виде  $\tau = \tau_1 \cdot n$ , где  $\tau_1$  – время контакта рабочего выступа прерывистого круга с обрабатываемой деталью, с;  $n$  – количество контактов рабочих выступов прерывистого круга с фиксированным сечением на обрабатываемой детали. Тогда параметр  $A$  определится:

$$A = \frac{V_{рез} \cdot \tau_1}{a}. \quad (11)$$

В этом случае  $\tau_1 < \tau$ , где  $\tau$  – время контакта обычного сплошного круга с обрабатываемой деталью, с. Поэтому, уменьшая время  $\tau_1 = l_{выст} / V_{кр}$  за счет уменьшения длины рабочего выступа прерывистого круга  $l_{выст}$  и увеличения скорости круга  $V_{кр}$ , можно уменьшить параметр  $A$  и соответственно температуру резания  $\theta$  согласно зависимости (2). При этом уменьшится величина  $l_2$ , т.к. в зависимости (9) необходимо вместо глубины шлифования  $t$  рассматривать величину  $t/n$ . Это создает условия более качественной обработки деталей машин при прерывистом шлифовании, что подтверждается экспериментальными данными [1].

Кроме того, при прерывистом шлифовании обеспечивается высокая режущая способность прерывистого круга вследствие его интенсивного самозатачивания [1], что снижает условное напряжение резания  $\sigma$ , максимальную температуру резания  $\theta_{max} = \sigma / (c \cdot \rho)$  и дополнительно уменьшает

температуру резания  $\theta$ . Следовательно, уменьшение температуры резания  $\theta$  при прерывистом шлифовании происходит как за счет уменьшения времени контакта шлифовального круга с фиксированным сечением на обрабатываемой детали, так и за счет уменьшения максимальной температуры резания  $\theta_{max}$ . При этом отношение  $\theta/\theta_{max}$  может оставаться постоянным. Из сказанного следует, что метод прерывистого шлифования является одним из наиболее эффективных методов финишной обработки, который обладает двойным эффектом снижения температуры резания [1].

Как показано выше, при точении также появляется возможность уменьшения максимальной температуры резания  $\theta_{max}$  и температуры резания  $\theta$  (при заданном значении отношения  $\theta/\theta_{max}$ ) за счет уменьшения условного напряжения резания  $\sigma$ , чего фактически нельзя добиться при обычном шлифовании сплошным кругом. При точении, как и при прерывистом шлифовании, уменьшается величина  $l_2$ . Это положительно отражается на качестве поверхностного слоя обрабатываемой детали и позволяет рассматривать эти два метода механической обработки альтернативой традиционно применяемому методу шлифования сплошным кругом на финишных операциях.

**Выводы.** Произведен расчет параметров теплового процесса при шлифовании и на его основе определены условия уменьшения температуры резания. Показано, что температура резания уменьшается по мере уменьшения доли тепла, возникающего при резании и уходящего в образующиеся стружки, и соответственно, увеличении доли тепла, уходящего в обрабатываемую деталь. При этом уменьшается глубина проникновения тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали. Установлено, что чем меньше условное напряжение резания, тем меньше температура резания. Этим доказана эффективность применения на финишных операциях вместо шлифования прогрессивных методов лезвийной обработки, характеризующихся меньшими значениями условного напряжения резания. Теоретически обоснована эффективность применения прерывистого шлифования. В этом случае уменьшение температуры резания происходит за счет уменьшения времени контакта рабочего выступа прерывистого круга с обрабатываемой деталью и за счет уменьшения условного напряжения резания вследствие работы круга в режиме интенсивного самозаточивания. Такой двойной эффект обработки фактически достигается лишь при прерывистом шлифовании, что является чрезвычайно важным фактором повышения качества и производительности обработки.

#### Список литературы:

1. Якимов А. В. Оптимизация процесса шлифования / А. В. Якимов. – М.: Машиностроение, 1975. – 175 с.
2. Новиков Ф. В. Основы математического моделирования технологических процессов механической обработки: монография / Ф. В. Новиков. – Д.: ЛИРА, 2018. – 400 с.
3. Сизый Ю. А. Динамика и теплофизика шлифования / Ю. А. Сизый, Д. В. Сталинский. – Харьков: ГП УкрНТЦ «Энергосталь», 2016. – 448 с.
4. Лавриненко В. И. Инструменты из сверхтвердых материалов в технологиях абразивной и физико-технической обработки: монография / В. И. Лавриненко, В. Ю. Солод. – Каменское: ДГТУ, 2016. – 529 с.
5. Современные технологии и техническое перевооружение предприятий: монография / Ф. В. Новиков, В. А. Жовтобрюх, А. А. Андилахай, Д. Ф. Новиков, В. И. Полянский. – Днепр: ЛИРА, 2018. – 400 с.
6. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф. В. Новикова и А. В. Якимова. В десяти томах. – Т. 2. «Теплофизика резания материалов». – Одесса: ОНПУ, 2003. – 625 с.
7. Полянский В. И. Определение максимально возможной производительности лезвийной обработки с учетом ограничения по температуре резания / В. И. Полянский // Резание и инструменты в технологических системах: Междунар. науч.-техн. сб. / Под общ. ред. проф. А. Н. Шелкового, редкол.: проф. А. И. Грабченко (отв. ред.) и др. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2018. – Вып. 89 (101). – С. 141–148.

#### References (transliterated)

1. Yakimov A. V. Optimizatsiya protsessa shlifovaniya [Optimization of the grinding process] / Moscow: Mashinostroyeniye, 1975. 175 p.
2. Novikov F. V. Osnovy matematicheskogo modelirovaniya tekhnologicheskikh protsessov mekhanicheskoy obrabotki: monografiya [Fundamentals of mathematical modeling of technological processes of machining: monograph] / Dnepr: LIRA, 2018. 400 p.
3. Sizyy YU. A., Stalinskiy D. V. Dinamika i teplofizika shlifovaniya [Dynamics and thermal physics of grinding] / Khar'kov: GP UkrNTTS "Energestal", 2016. 448 p.
4. Lavrinenko V. I., Solod V. YU. Instrumenty iz sverkhтвердых материалов v tekhnologiyakh abrazivnoy i fiziko-tekhnicheskoy obrabotki: monografiya [Tools from superhard materials in abrasive and physical-technical processing technologies: monograph] / Kamenskoye: DGTU, 2016. 529 p.
5. Novikov F. V., Zhovtobryukh V. A., Andilakhay A. A., Novikov D. F., Polyanskiy V. I. Sovremennyye tekhnologii i tekhnicheskoye perevooruzheniye predpriyatiy: monografiya [Modern technologies and technical re-equipment of enterprises: monograph] / Dnepr: LIRA, 2018. 400 p.
6. Fiziko-matematicheskaya teoriya protsessov obrabotki materialov i tekhnologii mashinostroyeniya [Physicomathematical theory of material processing processes and engineering technology] / Pod obshch. red. F.V. Novikova i A.V. Yakimova. V desyati tomakh. – Vol. 2. "Teplofizika rezaniya materialov" [Vol. 2. "Thermophysics of cutting materials"]. – Odessa: ONPU, 2003. 625 p.
7. Polyanskiy V. I. Opredeleniye maksimal'no vozmozhnoy proizvoditel'nosti lezviynoy obrabotki s uchetom ogranicheniya po temperature rezaniya [Determination of the maximum possible productivity of blade processing, taking into account restrictions on cutting temperature] / Rezaniye i instrumenty v tekhnologicheskikh sistemakh: Mezhdunar. nauch.-tekhn. sb. [Cutting and tools in technological systems: Intern. scientific and technical Sat] / Pod obshch. red. prof. A. N. Shelkovogo, redkol.: prof. A. I. Grabchenko (otv. red.) i dr. Khar'kov: NTU "KHPI", 2018. Vyp. 89 (101). P. 141–148.

Поступила (received) 02.12.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Полянський Володимир Іванович (Полянський Владимир Иванович, Polyansky Vladimir)** – кандидат технічних наук, Генеральний директор, ТОВ "Імперія металів", м. Харків; тел.: +38-067-57-80-906; e-mail: fokusnic1@rambler.ru; ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5482-9955>

УДК 621.791.927

*С. П. РОМАНЮК***РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ВЫСОКОУГЛЕРОДИСТОЙ ЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ**

Рассмотрена технология восстановления деталей наплавкой. В качестве модификатора восстановительных покрытий использовали немагнитную составляющую детонационной шихты, полученную от утилизации боеприпасов. Для анализа степени эффективности предложенной технологии сопоставительно проведены комплексные исследования и оценено влияние состава электрода, используемого модификатора на качество сварного шва, переходной зоны, а также структуру металла восстановленного покрытия. Показано, что лучшие результаты достигнуты при обмазке модифицирующей шихтой электрода Т590. Максимальная микротвердость при нагрузке 0,245 N составила 1498,3 МПа. Это обеспечивает повышение износостойкости модифицированного наплавленного слоя на 17 %.

**Ключевые слова:** высокоуглеродистая легированная сталь, электродуговая наплавка, модифицирование, детонационная шихта, восстановление деталей.

*С. П. РОМАНЮК***РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВІДНОВЛЕННЯ ПОВЕРХНІ ДЕТАЛЕЙ З ВИСОКОВУГЛЕЦЕВОЇ ЛЕГОВАНОЇ СТАЛІ**

Розглянуто технологію відновлення деталей наплавленням. В якості модифікатора відновлювальних покриттів використовували немагнітну складову детонаційної шихти, отриману від утилізації боеприпасів. Для аналізу ступеню ефективності запропонованої технології порівняльно проведені комплексні дослідження і оцінено вплив складу електроду, що використовується, модифікатора на якість зварного шву, перехідної зони, а також структуру металу відновленого покриття. Показано, що найкращі результати досягнуті при обмазці модифікуючою шихтою електроду Т590. Максимальна микротвердість при навантаженні 0,245 N складала 1498,3 МПа. Це забезпечує підвищення зносостійкості модифікованого наплавленого шару на 17%.

**Ключові слова:** високовуглецева легувана сталь, електродугове наплавлення, модифікування, детонаційна шихта, відновлення деталей.

*S. P. ROMANIUK***DEVELOPMENT OF TECHNOLOGICAL PROCESS FOR RESTORING THE SURFACE OF TOOLS MADE OF HIGH-CARBON ALLOY STEEL**

The technology of restoring by surfacing parts from high-carbon alloy steel is considered. The non-magnetic component of the detonation charge obtained from the disposal of ammunition was used as a modifier of recovery coatings. To analyze the degree of effectiveness of the proposed technology, comprehensive studies were carried out using optical and electron microscopy, X-ray spectral analysis, and microhardness assessment. A comparative study was made of the influence of the composition of the electrode and the used modifier from recycled materials on the quality of the weld, transition zone, and also the metal structure of the reduced coating. It is shown that cracks are formed when surfacing with the TsL11 electrode without a modifier; when using ANO-21, zones with a significant drop in microhardness are present. The features of the distribution of components during surfacing were studied, and stability studies of the properties of the reduced layer with the introduction of a charge were carried out. It was shown that the modifying additive is distributed not only in the deposited layer, but also in the transition layer. The use of additives 2-3 times reduces the width of the transition layer, contributes to greater adhesion. The best results were achieved when coated with a modifying mixture of the T590 electrode. The maximum microhardness at a load of 0.245N was 1498.3 MPa. This provides an increase in wear resistance of the modified deposited layer by 17%.

**Keywords:** high-carbon alloy steel, electric arc surfacing, modification, detonation charge, restoration of parts.

**Введение.** Дороговизна готовых деталей из высоколегированной стали обуславливает необходимость в поиске новых способов восстановления и повышения эксплуатационных характеристик рабочих поверхностей изделий. В машиностроении используют восстановление и упрочнение изношенного слоя деталей наплавкой. Широкое применение получили методы наплавки с модифицированием восстановленного слоя, что позволяет повысить потребительские свойства рабочей поверхности. В качестве модификатора используют различные тугоплавкие компоненты [1, 2], которые позволяют уменьшить размер зерен, повысить механические свойства восстанавливаемого поверхностного слоя. В зависимости от материала и условий эксплуатации детали определяют тип электрода, состав модификатора и параметры технологического процесса [3]. В проведенных ранее работах установлено, что для восстановления и упрочнения изделий, изготовленных из низколегированных и углеродистых марок сталей эффективно применение магнитной составляющей

детонационной шихты с обмазкой электрода [4, 5]. При восстановлении дисперсноупрочненных или со значительным количеством неметаллических включений сталей повышение износостойкости обеспечивает ввод такой модифицирующей присадки в виде шликерного покрытия [6].

Актуальным является в качестве модификатора при наплавке использование и тугоплавких соединений, в т.ч. оксидов, особенно мелкодисперсных и наноразмерных, у которых температура плавления достигает 3100 °C [7].

**Целью работы** является разработка параметров технологического процесса восстановления изношенной поверхности деталей из высокоуглеродистой легированной стали с использованием модифицирования наплавленного слоя.

**Методика проведения исследований.** В данной работе проведено исследование восстановленной поверхности изношенной детали из стали X12,

которая используется для упаковочного инструмента в кондитерском производстве. Такой инструмент в процессе эксплуатации подвергается износу с существенной структурной деградацией рабочей поверхности [8]. Наплавку проводили электродуговым методом при силе постоянного тока 135 А обратной

полярности. Учитывая тот факт, что восстановлению наплавкой подвергали изделия из высокоуглеродистой (2,2 %С) легированной хромом (12,12 %Cr) стали, использовали электроды с различным содержанием этих компонентов (табл. 1), чтобы оценить их наибольшую эффективность.

Таблица 1 – Химический состав электродов

Электроды		Компоненты, %								
Тип	Марка	C	Si	Mn	Cr	Ni	Nb	B	S	P
Э-320Х25С2ГР ГОСТ 10051-75	Т-590	2,9-3,5	2-2,5	1-1,5	22-27	-	-	0,5-1,5	0,035	0,04
Э-08Х20Н9Г2Б ГОСТ 10052-75	ЦЛ-11	0,05-0,12	<1,3	1-2,5	18-22	8-10,5	0,7-1,3	-	0,02	0,03
Э46 ГОСТ 9467-75	АНО-21	0,1	0,3	0,6	-	-	-	-	0,04	0,045

Сопоставительно анализировали качество поверхностного слоя детали, восстановленного наплавкой по следующим вариантам:

- наплавка электродом Т-590 диаметром 4 мм без введения добавок;
- наплавка электродом ЦЛ-11 (d=3 мм) без введения модифицирующих добавок;
- наплавка электродом АНО-21 (d=3 мм) без введения добавок;
- наплавка электродом Т-590 с обмазкой модифицирующей присадкой;
- наплавка электродом АНО-21 с обмазкой модифицирующей присадкой;
- наплавка электродом ЦЛ-11 с обмазкой модифицирующей присадкой.

В качестве модификатора использовали немагнитную составляющую детонационной шихты, отличающуюся более мелкими включениями алмазной фракции, полученной от утилизации боеприпасов. Она включала %: 0,005Na, 0,21Mg, 0,7Al, 0,25Si, 0,002S, 0,02P, 0,36Ba, 0,045Ca, 0,46C, 0,45Cl, 0,013K, 0,06Fe, 2,59O<sub>2</sub>, 0,07Ti, 0,26Cu, 0,15Zn, 0,29Pb, оксиды, нано- и дисперсные алмазы. При этом оптимальное соотношение присадки относительно доли электрода составляет 5-7 %. Это ограничение обусловлено тем, что в шихте присутствуют оксиды и увеличение концентрации которых приводит к появлению пор и газовых пузырей в наплавленном слое (рис. 1).

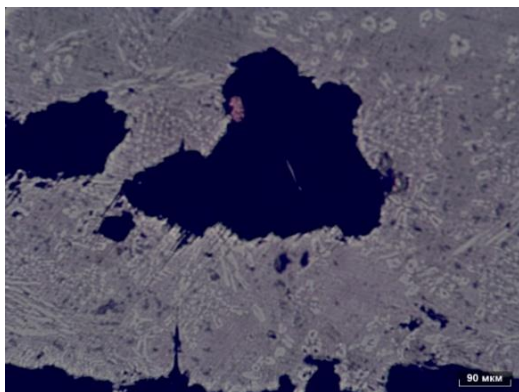


Рис.1 – Структура наплавленного слоя электродом Т-590 с добавлением модификатора более 10%

Для анализа степени эффективности предложенной технологии проводили комплексные исследования с использованием оптической (металлографический микроскоп Optika IM-3MET) и сканирующей электронной микроскопии (JEOL JSM-6390LV), микрорентгеноспектрального анализа, а также оценкой микротвердости (микро-Виккерс UIT HVmicro-1).

**Результаты исследований и их обсуждение.** Важным этапом при разработке новой технологии восстановления деталей является исследование основных закономерностей влияния параметров предложенного метода на работоспособность изделия. Основное внимание уделено зоне проплавления восстанавливаемой детали и переходной от основного металла к наплавленному, так как они являются основными параметрами качества восстановительной рабочей поверхности.

Проведенными исследованиями было установлено, что при наплавке электродом ЦЛ11 без модификатора формируются трещины (рис.2), чего не происходит при вводе детонационной шихты. Наличие присадки снижает температуру жидкой ванны и уменьшает скорость охлаждения металла шва, препятствует охрупчиванию переходной зоны и образованию трещин, которые формируются при наплавке без введения модификатора.

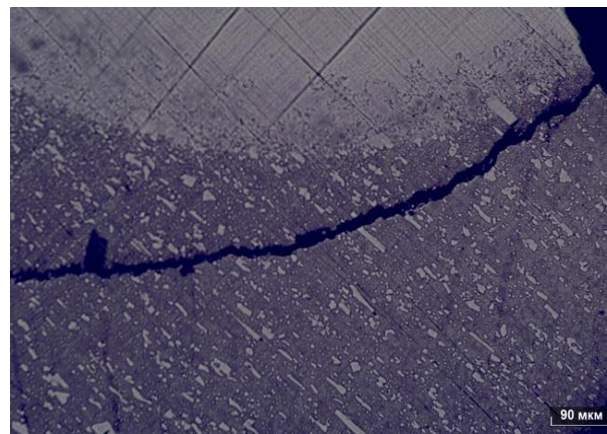


Рис. 2 – Структура восстановленной детали при наплавке электродом ЦЛ11 без модификатора



Таблица 2 – Содержание компонентов при восстановлении электродом Т590 без модифицирующей присадки

Спектр	C	O	Si	Cr	Fe	Ni	Итого
1	7.34	1.34	1.35	19.69	69.64	0.63	100.00
2	6.50	1.61	0.31	11.63	79.63	0.32	100.00
3	6.20	1.50	0.46	10.33	81.51	-	100.00

Микрорентгеноспектральным анализом установлено, что химический состав переходного слоя отличается от основного и наплавленного металла концентрацией компонентов, в частности, углерода, кремния и хрома (рис. 3, табл. 2).

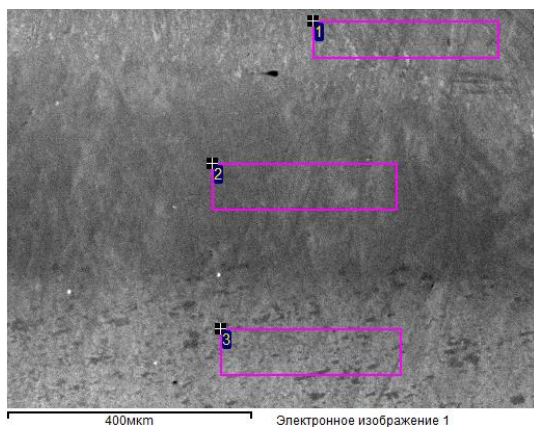


Рис. 3 – Переходная зона при восстановлении электродом Т590 без ввода модификатора

Методом оптической микроскопии выявлено, что введение модифицирующей присадки в 2–3 раза уменьшает глубину проплавления детали и ширину переходного слоя, тем самым снижая долю компонентов основного металла.

Модифицирующая добавка распределяется не только в наплавленном слое, но и в переходном (рис. 4), способствует большей прочности сцепления. Анализом выявлено скопление включений на границе сплавления (рис. 5).

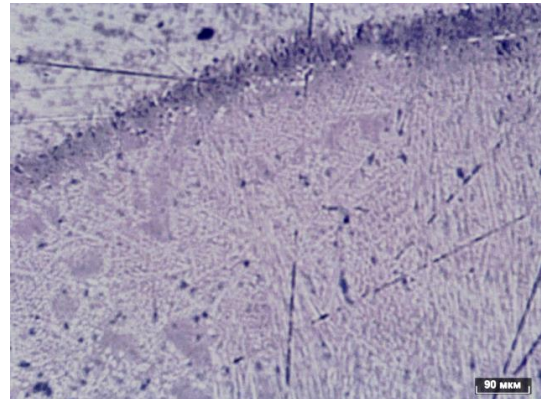
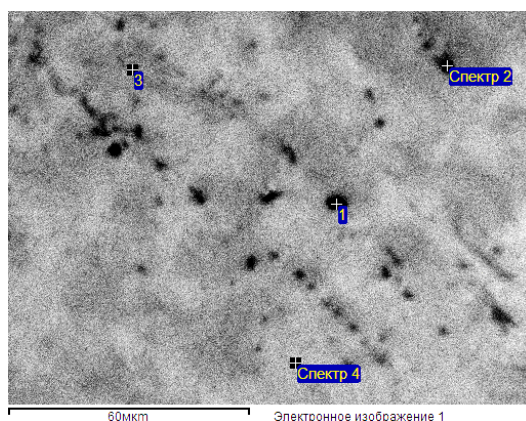


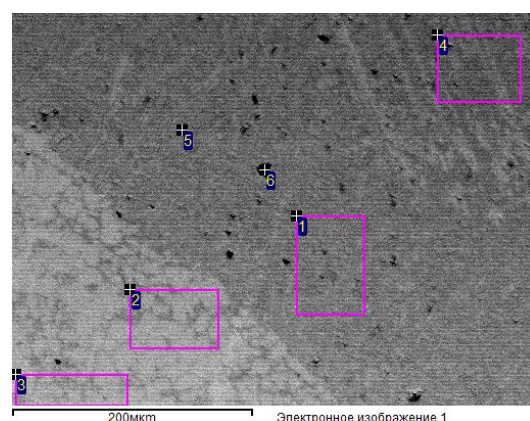
Рис.4 – Структура восстановленной детали при наплавке электродом Т590 с обмазкой модифицирующей шихтой

Химический состав включений, расположенных в переходном слое оценивали на растровом электронном микроскопе JEOL JSM-6390LV при ускоряющем напряжении 15kV (табл.3 и табл.4 (спектр 5 и 6)). Локально выявлены включения, которые содержат C, N, Na, Mg, Al, P, S, Cl, K, Ca, Cr, Fe (табл.3).

Из анализа рис. 5,а следует, что выявленные включения, в основном, представляют собой раздробленные включения карбидов хрома (содержат 12,65–19,45 %Cr). Кроме того, анализ матрицы сплава, приведенный на рис.5, и табл.3, табл.4(спектр 5 и 6) показали, что переходной слой включает компоненты модифицирующей детонационной шихты и значительную долю алмазной фазы. Об этом свидетельствует повышенная концентрация таких компонентов как углерод (20.41–26.84 %C), кислород (8,95 %), сера (0,5 %), хлор (0,91 %), кальций (0,13 %), медь (0,94 %) и др.



а



б

Рис.5 – Включения в переходном слое при наплавке электродом Т590 и их анализ

Таблица 3 – Распределение компонентов в переходном слое (рис.5,а)

Спектр	C	O	Si	S	Cl	Ca	V	Cr	Fe	Cu	Итого
1	13.07	8.95	0.36	0.50	0.91	0.13		13.41	61.72	0.94	100.0
2	9.49	1.31	0.36			0.09		12.65	76.09		100.0
3	9.53	1.38	0.20	0.09			0.23	19.45	69.11		100.0
4	7.25		0.31	0.11				6.80	85.53		100.0

Таблица 4 – Локальное распределение включений в переходном слое (рис.5,б)

Спектр	C	N	O	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Cr	Fe	Ti	V	Ni	Итого
1	11.48					0.08	0.87		0.09				17.38	69.69	0.04	0.07	0.29	100.0
2	10.58		0.75			0.11	0.36		0.06				10.79	77.11			0.24	100.0
3	11.07		0.80			0.09	0.25		0.04				12.38	75.36				100.0
4	10.42		1.12			0.03	0.91		0.04				17.51	69.69		0.08	0.20	100.0
5	20.41	7.85	-	1.05	0.16	0.32	-	0.11	0.42	0.26	0.33	0.26	14.41	54.43				100.0
6	26.84	2.30	5.11	0.12	-	0.04	0.81	-	0.25	0.12	0.03	1.12	12.44	50.83				100.0

Можно предположить, что из-за небольшой доли наплавочной зоны (до 30мм) в эксперименте летучие компоненты не успели удалиться и вместе с пленочными покрытиями на алмазной фракции локально осели в этой зоне. Вероятно, этому способствует и снижение температуры жидкой ванны при вводе модифицирующей присадки.

Проведены сопоставительные исследования стабильности свойств восстановленного слоя без введения модифицирующей присадки электродами АНО-21, ЦЛ11, Т-590, и с ее использованием. Наплавленный слой электродом ЦЛ11 имеет наименьшую микротвердость, которая достигает 446,7 МПа, что в 1,7 раз ниже чем у основного металла изделия.

Исследованиями установлено, что при использовании электрода АНО-21 без введения модифицирующей присадки формируются зоны с существенным (в 6 раз) падением микротвердости по сравнению с наплавленным металлом.

Лучшие результаты достигнуты при обмазке модифицирующей шихтой электрода Т590. Максимальная микротвердость при нагрузке 0,245N составила 1498,3 МПа, что в 1,5 раза выше чем основного металла упаковочного ножа из стали Х12. Такое модифицированное покрытие имеет на 17% выше микротвердость и износостойкость по сравнению с наплавкой без добавок.

**Выводы.** Предложена технология восстановления поверхности деталей из высоколегированной стали с использованием модифицирования наплавленного покрытия. В качестве модифицирующей присадки использовали немагнитную составляющую детонационной шихты, которая содержит мелкодисперсные и наноразмерные алмазы, а также оксиды. Проведены сопоставительные исследования по двум вариантам восстановления поверхностного изношенного слоя детали с одинаковыми параметрами технологического процесса: без ввода каких-либо добавок электродами

АНО-21, ЦЛ11, Т-590 и с их обмазкой модифицирующей присадкой.

Оценено влияние состава электрода и используемого вторичного сырья на состав и распределение компонентов, качества сварного шва, переходной зоны, а также структуру металла покрытия. Установлено, что при наплавке электродом ЦЛ11 без модификатора формируются трещины, при использовании АНО-21 – присутствуют зоны с существенным падением микротвердости. Наиболее стабильные свойства восстановленного слоя обеспечиваются с введением шихты. Введение модифицирующей присадки в 2-3 раза уменьшает глубину проплавления детали и ширину переходного слоя, тем самым снижает долю основного металла в покрытии.

Установлено, что лучшие результаты достигнуты при использовании электрода Т590 с обмазкой немагнитной составляющей модифицирующей шихты. Предложенная технология обеспечивает повышение микротвердости и износостойкости на 17% при эксплуатации по сравнению с наплавкой без добавок.

#### Список литературы

1. Скобло Т.С., Рыбалко И.Н., Марков А.В. Применение наноалмазов для повышения качества восстанавливаемого слоя наплавкой // *Современные проблемы освоения новой техники, технологий, организации технического сервиса в АПК: материалы Международной научно-практической конференции.* – Минск, 2014. – С.258–261.
2. Задиранов А.Н., Кац А.М. *Теоретические основы кристаллизации металлов и сплавов* М.: Издательство Российский университет дружбы народов, 2007. – 228 с.
3. Гольдштейн Я.Е., Мизин В.Г. *Модифицирование и микролегирование чугуна и сталей.* М.: Металлургия, 1986. – 272 с.
4. Скобло Т.С., Романюк С.П., Омельченко Л.В. Исследование влияния способа наплавки на свойства металла восстанавливаемой детали. *Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка.* – Харків, 2017. – Вип. 183. – С. 145–150.
5. Патент Украины №117615, МПК В22D 19/08, В22D 19/10. Спосіб підвищення властивостей покриттів модифікаціям при наплавленні / Т.С. Скобло, О.І. Сідашенко, С.П. Романюк, Л.В.Омельченко, І.М. Рибалко, О.О. Гончаренко, В.М. Заєць;

- заявник та патентотримувач Т.С. Скобло. – у 2017 01633. заявл. 20.02.17.; опубл. 26.06.17., Бюл. № 12.
6. Патент України № 128982 Спосіб відновлення деталей дисперснозміцнених або зі значним скупченням неметалевих включень сталей / Т.С. Скобло, О.В. Нанка, О.І. Сідашенко, С.П. Романюк, Л.В.Омельченко, О.О. Гончаренко, Є.А. Сатановський, О.К. Олійник, О.В. Марков; заявник та патентотримувач Скобло Т. С. – у 2018 05772. заявл. 23.05.2018; опубл. 10.10.18., Бюл. № 19.
  7. Шелудяк Ю. Е., Кашпоров Л. Я. и др. *Теплофизические свойства компонентов горючих систем.* – М.: 1992. – 184 с.
  8. Skoblo T.S., Romaniuk S.P., Sidashenko A.I., Garkusha I.E., Taran V.S., Taran A.V., Demchenko S.V. Study of degradation mechanism of metal-cutting tools and their hardening by ZrN PVD coatings. *Problems of atomic science and technology. Series: Plasma Physics* (24). – Kharkov, 2018. – No6. – P. 300–303.
- References (transliterated)**
1. Skoblo T.S., Rybalko I.N., Markov A.V. Primenenie nanoalmazov dlja povysheniya kachestva vosstanavlivaemogo sloja naplavkoj // *Sovremennye problemy osvoeniya novoj tehniki, tehnologij, organizacii tehniceskogo servisa v APK: materialy Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii.* – Minsk, 2014. – P. 258–261.
  2. Zadiranov A.N., Kac A.M. *Teoreticheskie osnovy kristallizacii metallov i splavov* Moscow: Izdatel'stvo Rossijskij universitet druzhby narodov, 2007. 228 p.
  3. Gol'dshtejn Ja.E., Mizin V.G. *Modificirovanie i mikrolegirovanie chuguna i stalej.* Moscow: Metallurgija, 1986. – 272 p.
  4. Skoblo T.S., Romanjuk S.P., Omel'chenko L.V. Issledovanie vlijaniya sposobu naplavki na svojstva metalla vosstanavlivaemoj detali. *Visnyk XNTUSG im. P. Vasylenka.* – KHarkiv, 2017. Vy`p. 183. – P. 145–150.
  5. Patent Ukrainy No117615, MPK B22D 19/08, B22D 19/10. Spisib pidvy`shhennya vlasty`vostej pokry`ttiv mody`fikavnyyam pry`naplavlenni / T.S. Skoblo, O.I. Sidashenko, S.P. Romanyuk, L.V. Omel`chenko, I.M. Ry`balko, O.O. Goncharenko, V.M.Zayecz`; zayavny`k ta patentoutry`muvach T.S. Skoblo. u 2017 01633. zayavl. 20.02.17.; opubl. 26.06.17, Byul. No 12.
  6. Patent Ukrainy No 128982 Spisib vidnovlennya detalej dy`spersnozmiczneny`x abo zi znachny`m skupchennyam nemetalevy`x vklyuchen` stalej / T.S. Skoblo, O.V. Nanka, O.I. Sidashenko, S.P. Romanyuk, L.V.Omel`chenko, O.O. Goncharenko, YeA. Satanov`ky`j, O.K. Olijny`k, O.V. Markov; zayavny`k ta patentoutry`muvach Skoblo T. S. – u 2018 05772. zayavl. 23.05.2018; opubl. 10.10.18, Byul. No 19.
  7. Sheludjak Ju. E., Kashporov L. Ja. i dr. *Teplofizicheskie svojstva komponentov gorjuchih sistem.* Moscow: 1992. – 184 p.
  8. Skoblo T.S., Romaniuk S.P., Sidashenko A.I., Garkusha I.E., Taran V.S., Taran A.V., Demchenko S.V. Study of degradation mechanism of metal-cutting tools and their hardening by ZrN PVD coatings. *Problems of atomic science and technology. Series: Plasma Physics* (24). – Kharkov, 2018. No6. P. 300–303.
- Поступила (received) 14.12.2019*

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

**Романюк Светлана Павловна (Романюк Світлана Павлівна, Romaniuk Svetlana Pavlovna)** – кандидат технічних наук, Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенко, старший преподаватель кафедри «Технології матеріалів», г. Харків; тел.: (057)716-41-53, e-mail: romaniuk.khntusg@gmail.com.

УДК 621.7.044

*Н. Ф. САВЧЕНКО, С. А. ДИТИНЕНКО, Я. Ю. ДЕМЕНТЕЕВА***ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ИЗДЕЛИЙ МЕТОДАМИ БЕСПРЕССОВОЙ ИМПУЛЬСНОЙ ШТАМПОВКИ**

Исследуются особенности беспрессовой импульсной штамповки тонкостенных деталей при появлении в процессе штамповки таких технологических несовершенств, как гофры или бухтины на поверхности полуфабрикатов. Используя зависимости для оценки меридиональных и тангенциальных деформаций, проведена оценка максимальных значений в зависимости от размеров зоны двухосного растяжения. Это позволяет оценить максимально допустимую величину гофров на поверхности полуфабрикатов и возможность искусственного регулирования процесса раздачи полуфабриката, возможную величину степени раздачи при последующей доштамповке полуфабриката. Для повышения качества осесимметричных деталей предложено метод штамповки крупногабаритных изделий с искусственным регулированием технологических несовершенств, например, локальных выштамповок или гофрирования на поверхности полуфабрикатов, регулирования размеров зон пластической устойчивости. Отражены основные особенности оценки технологических параметров. Предложена методика оценки степени деформации на поверхности полуфабриката в зависимости от соотношения размеров глубины штамповки полуфабриката и радиуса зоны двухосного растяжения. Предложенная технология беспрессовой импульсной штамповки позволит снизить опасность возникновения брака и уменьшить разнотолщинность осесимметричных деталей типа днищ.

**Ключевые слова:** штамповка, гофр, полуфабрикат, раздача, деформация, работа.

*Н. Ф. САВЧЕНКО, С. А. ДИТИНЕНКО, Я. Ю. ДЕМЕНТЕЕВА***ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ВИГОТОВЛЕННЯ ВІСЕСИМЕТРИЧНИХ ВИРОБІВ МЕТОДАМИ БЕЗПРЕСОВОГО ІМПУЛЬСНОГО ШТАМПУВАННЯМ**

Досліджуються особливості беспрессового імпульсного штампування тонкостінних деталей при появі в процесі штампування таких технологічних недосконалостей, як гофри або бухтини на поверхні напівфабрикатів. Використовуючи залежності для оцінки меридіональних і тангенціальних деформацій, проведена оцінка максимальних значень в залежності від розмірів зони двухосного розтягування. Це дозволяє оцінити максимально допустиму величину гофров на поверхні напівфабрикатів і можливість штучного регулювання процесу роздачі напівфабрикату, можливу величину ступеня роздачі при подальшій доштамповке напівфабрикату. Для підвищення якості вісесиметричних деталей запропоновано метод штампування великогабаритних виробів зі штучним регулюванням технологічних недосконалостей, наприклад, локальних виштамповок або гофрування на поверхні напівфабрикатів, регулювання розмірів зон пластичної стійкості. Відображено основні особливості оцінки технологічних параметрів. Запропоновано методику оцінки ступеня деформації на поверхні напівфабрикату в залежності від співвідношення розмірів глибини штампування напівфабрикату і радіусу зони двухосного розтягування. Запропонована технологія беспрессового імпульсного штампування знизить небезпеку виникнення шлюбу і дозволить зменшити разнотолщинність осесиметричних деталей типу днищ.

**Ключові слова:** штампування, гофр, напівфабрикат, роздача, деформация, работа/

*N. F. SAVCHENKO, S. A. DITINENKO, Y. Yu. DEMENTEYEVA***IMPROVING THE QUALITY OF MANUFACTURE OF AXISYMMETRIC PRODUCTS BY METHODS OF A PRESSLESS PULSE STAMPING**

The features of pressureless pulse stamping of thin-walled parts are studied when such technological imperfections as corrugations or coils appear on the surface of semi-finished products during stamping. Using the dependences to assess the meridional and tangential strains, the maximum values are estimated depending on the size of the biaxial tension zone. This allows you to evaluate the maximum allowable value of the corrugations on the surface of the semi-finished products and the possibility of artificially regulating the process of distribution of the semi-finished product, the possible value of the degree of distribution during the subsequent stamping of the semi-finished product. To improve the quality of axisymmetric parts, a method is proposed for stamping large-sized products with artificial regulation of technological imperfections, for example, local stampings or corrugation on the surface of semi-finished products, and regulation of the dimensions of plastic stability zones. The main features of the evaluation of technological parameters are reflected. A technique is proposed for assessing the degree of deformation on the surface of a semifinished product, depending on the ratio of the sizes of the stamping depth of the semifinished product and the radius of the biaxial tension zone. The proposed technology of pulseless stamping to reduce the risk of marriage and reduce the thickness difference of axisymmetric parts such as bottoms.

**Keywords:** stamping, corrugation, semi-finished product, distribution, deformation, work.

**Введение.** Снижение темпов внедрения новых технологий приводит к негативным процессам в современной экономике и снижению конкурентоспособности продукции отечественных товаропроизводителей. Поэтому важнейшими задачами, стоящими перед технологией машиностроения, являются не только снижение непроизводительных затрат, обусловленных снижением точности изготовления деталей штамповкой, но и улучшение эксплуатационных и прочностных свойств изделий, повышение их точности и качества [1–7].

Поиск эффективных методов интенсификации технологических процессов штамповки затрудняется из-за проблем повышения качества и точности заготовок, возникающих преимущественно из-за отсутствия методов предупреждения потери

пластической устойчивости – появления недопустимых по величине гофров или бухтин на поверхности деталей, локальным утонением стенок.

В известных исследованиях имеющиеся решения ограничены при приемочном контроле нормативными требованиями к листовым заготовкам (например, дефекты (царапины, трещины) или разнотолщинность плоских листовых заготовок для штамповки-вытяжки или формовки) [2–5] и не учитывают, как правило, особенности формообразования изделий из полуфабрикатов.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Однако известные методы интенсификации штамповки-вытяжки, формовки

[1–3] не всегда эффективны не только по технико-экономическим соображениям (отсутствие или физический износ имеющегося оборудования, высокая стоимость нового или большие эксплуатационные издержки при ремонте, хранении и т. д.). При проектировании технологии штамповки с раздачей полуфабриката учитывается:

1) гибкость  $\lambda$  (отношение диаметра или условного размера детали к толщине заготовки) или относительная толщина детали;

2) относительная глубина штамповки  $\bar{f}$ , определяемую отношением глубины (высоты) детали к ее диаметру или условному размеру;

3) механические характеристики материала (пределы прочности, текучести, относительное удлинение);

4) требования к качеству изделий, определяемые величиной утонений, наличием и размерами гофров на поверхности и отклонениями от норм, допустимыми по техническим условиям.

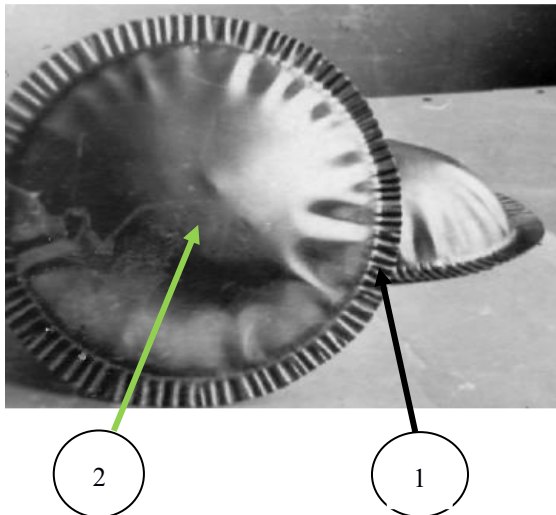


Рис. 1 – Типичные дефекты в виде гофров, возникающих в сжато-растянутых участках заготовки при изготовлении деталей большой гибкости  $\lambda > 200$ : 1 – гофры на купольной и фланцевой части заготовки; 2 – зона локальных, с последующим разрушением, утонений.

Неблагоприятное влияние дефектов особенно очевидно при анализе пространственной диаграммы (рис. 2), характеризующей изменения деформированного состояния деталей при увеличении  $\lambda$ . Пространственная диаграмма составлена по известным экспериментальным данным о характере распределения деформаций на стенках изделий, близких по форме к полусфере [1–4].

При этом характерные типы дефектов могут быть проиллюстрированы (рис. 1) как в виде появляющиеся в сжато-растянутых зонах заготовки гофров или в виде локальных зон утонений в купольной части изделия.

Гофры на поверхности полуфабриката и на фланце (рис. 1) отличаются по размерам, геометрии,

количеству. В основном гофры на поверхности полуфабриката возникают в виде четырех асимметричных групп. Эти группы, каждая в отдельности, могут включать один большой гофр, реже – два-три сомкнувшихся в виде волнистой поверхности гофров. К группам больших гофров примыкают меньшие по геометрическим размерам гофры. Гофры на поверхности полуфабриката в плане имеют ромбовидную форму. Вершины ромбического гофра направлены к зонам двухосного и одноосного растяжения.

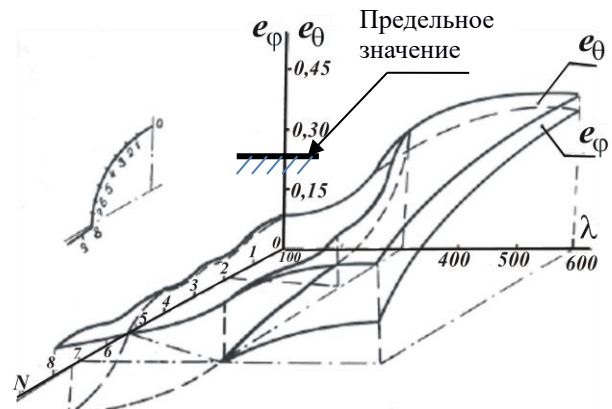


Рис. 2. – Изменение деформированного состояния деталей при увеличении гибкости  $\lambda$

Поэтому проблемы управления качеством как заготовок, так и полуфабрикатов, влияющие на точность и разнотолщинность стенок деталей приобретают важное значение.

**Цель работы** – повышение эффективности управления процессом формообразования штамповкой-вытяжкой тонколистовых деталей сложной формы на различных стадиях их формоизменения (а не только на конечных) путем прогнозирования условий потери пластической устойчивости в виде гофров на поверхности и возникновения локальных утонений.

**Изложение основного материала.** Для устранения брака из-за потери пластической устойчивости и обеспечения повышенных требований к точности при импульсных методах штамповки листовых (например, при газодетонационной штамповке) и пространственных заготовок следует предусмотреть максимально широкий спектр приемов управления напряженно-деформированным состоянием [2–5].

С этой целью при определении технологических параметров импульсной штамповки следует учитывать, как общие, так и принципиальные отличия механизмов формообразования тонкостенных изделий методами высокоскоростной (импульсной, например, гидровзрывная, электрогидравлическая и др.) и статической (традиционные способы изготовления изделий на прессах, молотах и др.) штамповки.

Общие особенности проявляются в необходимости использования прижимных устройств и удаления из полости матрицы воздуха, искусственного предупреждения или регулирования возникновения гофров в сжато-растянутых зонах заготовки.

Принципиальных отличий может быть значительно больше, так как следует учесть кратковременность процесса формообразования (менее 0,001...0,01 с), волновые эффекты, проявляющиеся в изменении формы образующей детали (конусность и локальные утонения стенок) и даже в просечке изделия в зоне радиуса закругления матрицы из-за «независимого» деформирования разнородных участков заготовки, причем более жестких в периферийных, фланцевых зонах.

Неблагоприятное влияние дефектов особенно очевидно при анализе пространственной диаграммы (рис. 1), характеризующей изменения деформированного состояния деталей при увеличении  $\lambda$ . Пространственная диаграмма составлена по известным экспериментальным данным о характере на стенках изделий, близких по форме к полусфере [1–4].

Из диаграммы можно установить, что ухудшение качества деталей (из-за локальных утонений) обусловлено изменением по сравнению с областью  $\lambda < 200$  условий распределения тангенциальных деформаций  $e_\varphi$  – в периферийных зонах (точки 5...9) изделий. В периферийной зоне при  $\lambda > 200$  тангенциальные деформации близки к нулю или изжимающих (при  $\lambda < 200$ ) становятся растягивающими, способствующими возникновению локальных утонений. Неблагоприятный характер распределения деформаций при  $\lambda > 200$  обусловлен возникновением гофров в сжато-растянутых (периферийных) участках заготовки (рис. 2). В результате этого невозможно (или весьма трудоемко) изготовление штамповкой в условиях плоского напряженного состояния изделий с  $\lambda > 200$  и  $\bar{f} < 0,2$ .

С повышением точностных требований к деталям технологические проблемы еще более возрастают из-за увеличения вероятности возникновения гофров, в то время как допуск на их величину весьма мал – меньше, чем на отклонение по диаметру.

Одним из путей решения проблем повышения качества штампуемых изделий типа днищ, параболических антенн и других крупногабаритных тонкостенных деталей может быть способ штамповки с раздачей полуфабриката, получаемого на первом–втором штамповочном переходах.

Можно считать, что на поверхности полуфабриката имеются две зоны (купольная и периферийная), граница которых определяется радиусом  $r_{др}$ . В купольной зоне возникает напряженное состояние, близкое к двухосному растяжению, а в периферийной – растяжению–сжатию. Поэтому проведем оценку размеров зоны

двухосного растяжения, за пределами которой возможно появление гофров (с вероятностью 99 %).

В исходном состоянии деформированное состояние полуфабриката с погрешностью [3], не превышающей 5%, может быть определено как

$$e_\varphi = \frac{1}{2} \left( \frac{f_n}{r_{др}} \right)^2 \cdot \left[ 1 - \left( \frac{r}{r_{др}} \right)^2 \right] \quad , \quad (1)$$

$$e_\theta = \frac{1}{2} \left( \frac{f_n}{r_{др}} \right)^2 \cdot \left[ 1 - \left( \frac{r}{r_{др}} \right)^2 \right] \quad . \quad (2)$$

Максимальные размеры зоны двухосного растяжения полуфабриката можно определить, задавая ее радиусом сферического сегмента:

$$r_{др} = R \cdot \sin \alpha_{др} \quad , \quad (3)$$

а максимально допустимое значение  $\alpha_{др}$  [3]:

$$\alpha_{др} \leq \frac{\pi}{6} \cdot \frac{\left( 1 + \frac{\sigma_s}{E} \right)}{\left( 1 + \frac{2}{3} e_\theta \right)} \quad (4)$$

Полученные зависимости (3–4) позволяют определить размеры сжато-растянутых, опасных в смысле возникновения гофров, зон заготовки – как разность между радиусами деталей и зоны двухосного растяжения  $\Delta r = r_0 - r_{др}$ , а также по уравнению (2) величину тангенциальной деформации  $e_\varphi$ .

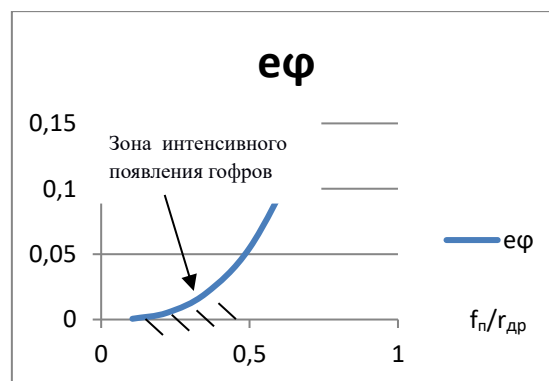


Рис. 3 – Изменение величины тангенциальной деформации  $e_\varphi$  от глубины и размеров зоны двухосного растяжения

Из графика можно видеть, что уже при сравнительно небольшой относительной глубине штамповки 5...10 % появление гофров на поверхности тонкостенных изделий с большой гибкостью ( $\lambda \geq 200$ ) практически неизбежно, даже при формовке с жестко защемленным фланцем. Для предупреждения возникновения неисправимого брака из-за неравномерной утяжки фланца проведенные эксперименты выявили необходимость при формоизменении искусственное увеличение размеров фланца заготовки. При этом установлено,

что относительный параметр  $\frac{\Delta r}{r_0}$ , учитывающий

увеличение размеров заготовки при малых степенях вытяжки ( $k < 1,2 \dots 1,35$ ) с целью предупреждения неравномерной утяжки фланца заготовки может на 15...20% быть меньше, чем для традиционных методов беспрессовой штамповки. Его значение не превышает  $\frac{\Delta r}{r_0} \leq 0,15$  площади заготовки, что

значительно меньше, чем для традиционных методов.



а

Рис.4 – Детали, отштампованные методом штамповки-раздачи: а – диаметром 700 и 900 мм и б – опытные образцы

Работа пластической деформации в общем случае может быть оценена как [3–5]:

$$W = \xi(n) \sigma_b V_o l_i^{1+n}, \quad (5)$$

где  $\xi(n)$ ,  $n$  – коэффициенты, зависящие от механических характеристик материала заготовки,  $\xi(n) = 1,55$ ;  $n \approx 0,10 \dots 0,65$ ;  $V_o$  – объем плоской заготовки (или ее части); для донной части осесимметричной заготовки:  $V_{одч} = 0,785 \pi d^2$ ; для сопрягающейся с ней периферийной, фланцевой, части:  $V_{олз} = 0,785 \pi d^2 (k^2 - 1)$ ;  $k$  – степень вытяжки, определяемая отношением диаметра заготовки к диаметру детали (отверстия матрицы);  $l_i$  – средняя интенсивность деформации соответствующего участка заготовки (фланца или донной части).

По технологической сложности детали с  $\lambda > 200$  можно разбить на четыре группы (по относительной глубине  $\bar{f}$ ):

$$\bar{f} < 0,2, \bar{f} > 0,2, \bar{f} \leq 0,4 \text{ и } \bar{f} > 0,4.$$

Дополнительным преимуществом разработанного метода можно считать и возможности использования при интенсификации процесса вытяжки методов искусственного регулирования размеров зон деформации [5–6], такие как увеличение радиуса протяжного ребра, снижение утонений купольной зоны заготовки (опасное сечение). Выбор основных технологических

При проектировании технологического процесса штамповки с последующей раздачей полуфабриката можно использовать условие, сформулированное из энергетических соображений:

$$W_{дч} \leq W_{лз}, \quad (5)$$

где  $W_{дч}$ ,  $W_{лз}$  – работа пластической деформации соответственно купольной (донной, “несущей”) и периферийной (фланцевой) зон штампуемой заготовки.

параметров штамповки может производиться в соответствии с рекомендациями, приведенными в [4–6].

Допустимая относительная высота гофров:

$$\bar{h} = [0,3 \exp 2e_\phi - 0,25]^{0,5} \quad (6)$$

где  $k_r$  – степень раздачи, определяемая, как отношение диаметра детали и полуфабриката:

$$k_r = \frac{d_0}{d_n} \approx 1,05 \dots 1,1$$

Проведенные исследования позволили использовать их результаты для разработки штамповки с раздачей полуфабриката, реализованного при штамповке как моделей, так и натуральных изделий (рис. 4). При этом максимальные значения утонений не превышали допустимы значения (20%).

**Выводы.** Таким образом, разработан и может быть рекомендован для штамповки тонкостенных изделий (с гибкостью более 200) метод штамповки с искусственным регулированием зон двухосного растяжения. При этом определены рациональные размеры полуфабриката, на 5...10%, меньшие размеров детали по диаметру. Как дальнейшая задача предполагается исследование особенностей штамповки изделий с формой в плане, отличной от осесимметричной.

## Список литературы:

1. Кириченко Л.Р. Конкурентоспособность технологий импульсной обработки материалов. / Л.Р. Кириченко // *Авиационно-космическая техника и технология: научно-технический журнал* – Х.: ХАИ, 2007. Вып. 11 (47). – С. 240–244.
2. Богуслаев В. А. Штамповка листовых деталей взрывом на ОАО «Мотор-Сич» / В.А. Богуслаев, О.И. Гавриш, С.А. Стадник // *Авиационно-космическая техника и технология: научно-технический журнал* – Х.: ХАИ, 2007. – Вып. 11 (47). – С. 192–196.
3. Баранов М.И. Прогрессивные импульсные технологии обработки материалов: история, физические основы и технические возможности. / М.И. Баранов // *Электротехника і електромеханіка.* – 2009. – №1. – С. 42–54.
4. Селиванов В.В. Взрывные технологии: учебник для вузов / В.В. Селиванов, И.Ф. Кобылкин, С.А. Новиков. – 2-е изд., – Москва: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. – 519 с.
5. Технологичность конструкции изделия / Ю.Д. Амиров, Т.К. Алферова, П.Н. Волков и др. – М.: Машиностроение, 1990. – 768 с.
6. Савченко Н.Ф. О проектировании техпроцессов гидровзрывной тонколистовой штамповки-вытяжки крупногабаритных деталей типа днищ / Н.Ф. Савченко // *Импульсная обработка металлов давлением: сб. статей под ред. канд. техн. наук В.К. Борисевича.* – М.: Машиностроение, 1977. – С. 51–56.
7. Савченко Н.Ф. Изготовление крупногабаритных деталей емкостей и резервуаров / Н.Ф. Савченко // *Вісник Харківського державного технічного університету сільського господарства. «Підвищення надійності відновлюємих деталей машин».* – Харків: ХДТУСГ, 2003. – Вип. 18. – С. 179–183.
8. Кириченко Л.Р. Научная школа профессора ПИХТОВНИКОВА РОСТИСЛАВА ВЯЧЕСЛАВОВИЧА / Л.Р. Кириченко, В.К. Борисевич, Н.Ф. Савченко // *Физические и компьютерные технологии: труды 13-й Междунар. научно-техн. конф., 19–20 апреля 2007, г. Харьков.* – Харьков: ХНПК «ФЭД», 2007. – С. 271–276.

## References (transliterated)

1. Kirichenko L.R. The competitiveness of pulsed materials processing technologies. / L.R. Kirichenko // *Aerospace Engineering and Technology: Scientific and Technical Journal* – KHarkov: KhAI, 2007. Issue. 11 (47). – P. 240–244.
2. Boguslaev V. A. Stamping of sheet metal parts by an explosion at OJSC Motor Sich / V. A. Boguslaev, O.I. Gavriish, S.A. Stadnik // *Aerospace engineering and technology: scientific and technical journal* – KHarkov.: KhAI, 2007. – Issue. 11 (47). – P. 192–196.
3. Baranov M.I. Progressive pulsed materials processing technologies: history, physical foundations and technical capabilities. / M.I. Baranov // *Electrical engineering and electrical engineering.* – 2009. – No. 1. – P. 42–54.
4. Selivanov V.V. Explosive technologies: a textbook for high schools / V.V. Selivanov, I.F. Kobylkin, S.A. Novikov. – 2nd ed., – Moscow: Publishing house of MGTU im. N.E. Bauman, 2014. – 519 p.
5. Manufacturability of product design / Yu.D. Amirov, T.K. Alferova, P.N. Volkov et al. – Moscow: Mechanical Engineering, 1990. – 768 p.
6. Sukhov VV Experience in creating gas-explosive systems with multipoint initiation of detonation of a methane-oxygen mixture / V.V. Sukhov // *Aerospace Engineering and Technology: Scientific and Technical Journal.* – KHarkov: KhAI, 2007. – Issue. 11 (47). – P. 182–185.
7. Savchenko N.F. Manufacture of large-sized parts of tanks and reservoirs / N.F. Savchenko // *News of the Kharkiv Sovereign Technological University of Silesia. "Predvysenny nadinosti v\_dnovlyuemih machine parts."* – Kharkov: KhDTUSG, 2003. – Vyp. 18. – P. 179–183.
8. Savchenko M.F. Pristry for detonation gas stamping. – Patent of Ukraine №72357, 02.15.2005 p.
9. Kirichenko L.R. Scientific School of Professor Pikhovnikov Rostislav Vyacheslavovich / L.R. Kirichenko, V.K. Borisevich, N.F. Savchenko // *Physical and computer technologies: proceedings of the 13th Intern. scientific and technical Conf., April 19–20, 2007, Kharkov.* – Kharkov: KhNPK “FED”, 2007. – P. 271–276.

Поступила (received) 01.12.2019

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

**Савченко Микола Федорович (Савченко Николай Федорович, Savchenko Mikola)** – кандидат технічних наук, доцент кафедри «Природоохоронні технології, екологія та безпека життєдіяльності» Харківського національного економічного університету імені Семена Кузнеця, м. Харків; тел.: (0572) 69-55-62; e-mail: savchenko.n.f@gmail.com, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9352-3112>.

**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>.

**Дементєєва Яна Юрїївна (Дементеева Яна Юрьевна, Dementeyeva Yana)** – інженер кафедри «Природоохоронні технології, екологія та безпека життєдіяльності» Харківського національного економічного університету імені Семена Кузнеця, м. Харків; тел.: (093) 14-10-164; e-mail: dementeeva@gmail.com.



УДК 620.179.16: 620.179.17

**САЛАМ БУССИ, С. Ю. ПЛЕСНЕЦОВ****ПРАКТИЧНІ РОЗРОБКИ ЕЛЕКТРОМАГНІТНО-АКУСТИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ**

Виконано аналіз інформаційних джерел, в яких наведені результати отримані за останні роки досліджень та розробок, направлених на створення нових ефективних електромагнітно-акустичних (ЕМА) перетворювачів (ЕМАП), призначених для вимірювань, контролю якості та діагностики матеріалів і виробів. Аналіз літературних джерел показав, що підвищення чутливості електромагнітно-акустичного контролю за рахунок збільшення величини індукції постійного поляризованого магнітного поля значно ускладнює сканування об'єкту контролю та веде до прискореного виходу з ладу ЕМА перетворювачів. Підвищення чутливості електромагнітно-акустичного контролю за рахунок збільшення потужності генераторів зондуючих імпульсів обмежено можливостями високочастотних котушок індуктивності ЕМА перетворювачів за причини їх пробою імпульсами високої напруги. Встановлена можливість суттєвого підвищення чутливості ЕМАП за рахунок використання імпульсних магнітних полів при умові виключення збудження когерентних і інших завод від ефекту Баркгаузена та магнітострикційного перетворення електромагнітної енергії в ультразвукову. Використання імпульсних магнітних полів дозволяє виключити пошкодження ЕМА перетворювачів та зменшити їх стирання об'єкту контролю.

**Ключові слова:** електромагнітно-акустичний перетворювач, ультразвукові хвилі, магнітне поле, джерело магнітного поля, об'єкт контролю, високочастотне електромагнітне поле, котушка індуктивності, контроль, вимірювання, діагностика

**САЛАМ БУССИ, С. Ю. ПЛЕСНЕЦОВ****ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНО-АКУСТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ**

Выполнен анализ информационных источников, в которых приведены результаты полученных за последние годы исследований и разработок, направленных на создание новых эффективных электромагнитно-акустических (ЭМА) преобразователей (ЭМАП), предназначенных для измерений, контроля качества и диагностики материалов и изделий. Анализ литературных источников показал, что повышение чувствительности электромагнитно-акустического контроля за счет увеличения величины индукции постоянного поляризованного магнитного поля значительно усложняет сканирование объекта контроля и ведет к ускоренному выходу из строя ЭМА преобразователей. Повышение чувствительности электромагнитно-акустического контроля за счет увеличения мощности генераторов зондирующих импульсов ограничено возможностями высокочастотных катушек индуктивности ЭМА преобразователей по причине их пробоя импульсами высокого напряжения. Установлена возможность существенного повышения чувствительности ЭМАП за счет использования импульсных магнитных полей при условии исключения возбуждения когерентных и других помех от эффекта Баркгаузена и магнитоstrictionного преобразования электромагнитной энергии в ультразвуковую. Использование импульсных магнитных полей позволяет исключить повреждение ЭМА преобразователей и уменьшить их истирание о поверхность объекта контроля.

**Ключевые слова:** электромагнитно-акустический преобразователь, ультразвуковые волны, магнитное поле, источник магнитного поля, объект контроля, высокочастотное электромагнитное поле, катушка индуктивности, контроль, измерение, диагностика

**SALAM BUSSI, S. Yu. PLESNETSOV****PRACTICAL DEVELOPMENT OF ELECTROMAGNETIC-ACOUSTIC CONVERTERS**

The analysis of information sources is carried out, in which the results of research and development obtained in recent years aimed at creating new effective electromagnetic-acoustic (EMA) transducers (EMAP) designed for measurements, quality control and diagnostics of materials and products are presented. Analysis of literature showed that increasing the sensitivity of electromagnetic-acoustic control by increasing the magnitude of the induction of a constant polarizing magnetic field greatly complicates the scanning of the test object and leads to an accelerated failure of the EMA converters. Increasing the sensitivity of electromagnetic-acoustic control by increasing the power of the probe pulse generators is limited by the capabilities of high-frequency inductors of the EMA transducers due to their breakdown by high voltage pulses. The possibility of a significant increase in the sensitivity of EMAT due to the use of pulsed magnetic fields has been established, provided that excitation of coherent and other interference from the Barkhausen effect and magnetostrictive conversion of electromagnetic energy into ultrasound are excluded. The use of pulsed magnetic fields eliminates damage to the EMA transducers and reduces their erasure on the surface of the control object.

**Keywords:** electromagnetic-acoustic transducer, ultrasonic waves, magnetic field, magnetic field source, control object, high-frequency electromagnetic field, inductor, control, measurement, diagnostics

**Вступ.** За останні роки опубліковано сотні робіт, присвячених дослідженням і розробкам електромагнітно-акустичних (ЕМА) перетворювачів (ЕМАП), найбільш важлива частина яких розглянута в статтях [1–2]. З аналізу цих робіт можна зробити наступні висновки щодо ЕМАП:

1. Основу ЕМА перетворювача складають три основні елементи: один або декілька джерел поляризованого магнітного поля, одно або декілька джерел електромагнітного поля (котушок індуктивності з струмом різного виду) і поверхневого шару або об'єму об'єкта контролю (ОК).

2. У багатьох випадках джерела поляризованого магнітного поля і котушки індуктивності ЕМАП мають індивідуальну конструкцію, що визначається головним чином геометричними параметрами ОК.

3. Принципову роль в роботі ЕМАП грають властивості поверхневого шару або об'єму матеріалу а також геометричні характеристики ОК.

Неоднозначність і неоднорідність властивостей матеріалу контрольованих виробів створюють істотні труднощі при конструюванні ЕМА перетворювачів.

На значні складності при конструюванні ЕМАП вказує Сазонов Ю.І., [3] оскільки, на його думку, одночасно необхідно враховувати «...проблеми радіофізики, фізичної та прикладної акустики, фізики твердого тіла, фізики магнітних явищ, теплофізики та молекулярної фізики», а також нетиповість електродинаміки взаємодії полів різного типу і структури з ОК. Істотні труднощі при створенні ЕМАП відзначили Чабанов В.Є. і Жуков В.А. [4]. Вони стверджують, що робота п'єзоелектричних перетворювачів визначається всього 5–7 конструктивними параметрами, в той час як ефективність роботи ЕМАП залежить мінімум від 35 параметрів. З іншого боку Судакова К.В. і

Казюкевіч І.Л. [5] практично показали, що за рахунок використання автоматичних ультразвукових установок з ЕМАП на ВАТ «Северсталь» отримані істотні економічні переваги, що стимулює подальші дослідження і розробки ЕМА перетворювачів.

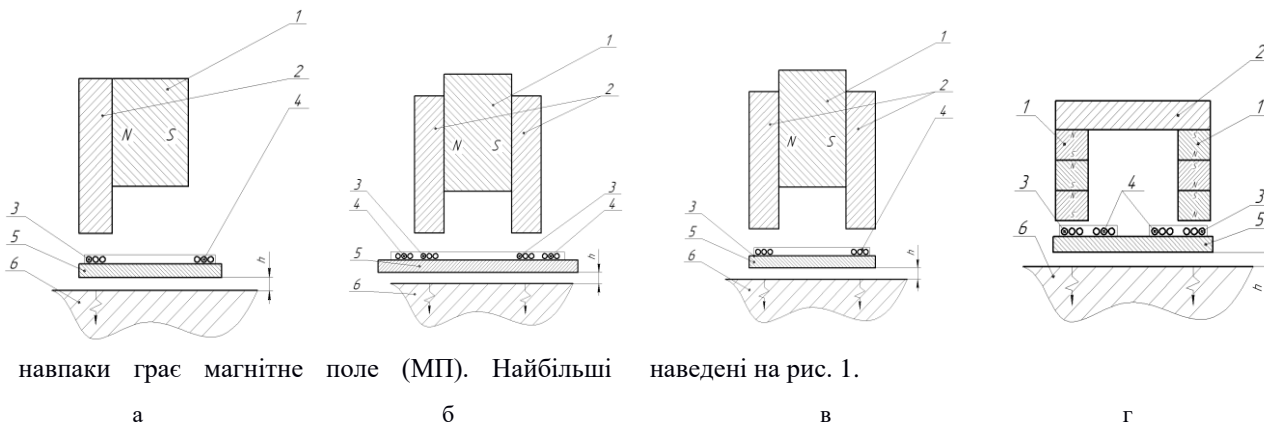
Тому наявність ОК з різними властивостями, різноманітність конструкцій котушок індуктивності і систем, що намагнічують, потреба і можливість збудження і прийому різних типів хвиль і їх мод, зумовило розробку величезного числа модифікацій ЕМА перетворювачів і їх елементів.

Ще в 1975 р Аббакумов К.Є. [6] намагався розробити універсальні ЕМАП для збудження і прийому імпульсів ультразвукових коливань. Однак до теперішнього часу ця проблема не вирішена.

Метою роботи є аналіз нових інформаційних джерел і встановлення тенденцій вдосконалення і розробки нових типів ЕМА перетворювачів.

**Сучасні ЕМА перетворювачі.** Єрмолов І.М. в довіднику [7] вказав на недостатність розробок ЕМАП і спеціального обладнання для їх функціонування. В першу чергу це відноситься до елементів ЕМА перетворювачів. У роботах [8-10] авторами показано, що основну роль в перетворенні електромагнітної енергії в механічну (ультразвукову)

складності для формування максимальної індукції магнітного поля виникає для джерел магнітного поля (ІМП) портативних приладів. ІМП для ручних приладів ультразвукового контролю повинні задовольняти багатьом суперечливим вимогам. Вони повинні формувати магнітне поле з максимальною індукцією, тому що коефіцієнт подвійного ЕМА перетворення залежить від цього параметра квадратично [7]. З іншого боку, при контролі ферромагнітних виробів, сила притискання ЕМАП до ОК повинна бути прийнятною з точки зору зусиль, які докладають оператори і, відповідно, забезпечення можливості сканування виробу. Слід враховувати необхідність контролю виробів з неелектропровідними неферромагнітними покриттями (наприклад, пофарбовані ОК) [10]. Тобто зміна величини індукції в залежності від відстані до поверхні металу повинно бути мінімальним. Відстань від торця полюса ІМП до котушки індуктора перетворювача має бути мінімальною, але при цьому в полюсі не повинні збуджуватися когерентні завади. Елементи конструкції ІМП не повинні формувати поле поза робочої зони ЕМАП. Габарити джерела ІМП повинні бути прийнятними з точки зору зручності використання дефектоскопістом при скануванні. Спрощені схеми деяких ІМП портативних ЕМАП



і навпаки грає магнітне поле (МП). Найбільші

наведені на рис. 1.

Рис. 1 – Схематичне зображення ІМП і їх розташування щодо котушок індуктивності ЕМАП [9]

На рис. 1а, б і г показано: 1 – магніти; 2 – магнітопроводи; 3 – робочі ділянки високочастотних котушок; 4 – неробочі ділянки високочастотних котушок; 5 – протектор; 6 – ОК,  $h$  – повітряний прошарок між ЕМАП і поверхнею ОК.

На рис. 1в: 3 і 4 – робочі ділянки високочастотної котушки, використовуваної для синфазного випромінювання і прийому.

На рис. 1а і в наведені варіанти схем для суміщених ЕМАП, що збуджують і приймають зсувні коливання нормально поверхні ОК.

На рис. 1б і г наведені варіанти виконання роздільно-суміщеного ЕМАП.

На рис. 1г наведено варіант ІМП, призначений для одночасного формування нормального і тангенціального магнітних полів із застосуванням постійних магнітів і магнітопроводів. Перевагою такого пристрою є мінімальне розсіювання МП. Недоліком є суттєва сила притискання ЕМАП до ОК з ферромагнітного матеріалу.

Складною проблемою при конструюванні ЕМАП є створення МП заданої спрямованості поза габаритами ІМП, часто на досить значній відстані. Особливо це важливо при контролі неферромагнітних матеріалів. В цьому випадку значних величин індукції МП можна досягти при використанні принципу витіснення магнітного поля. Варіанти конструкцій таких ІМП з елементами ЕМАП показані на рис. 2.

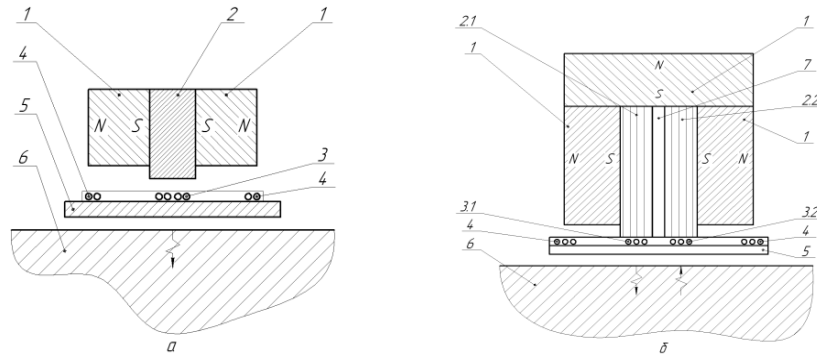


Рис. 2 – Схематичне зображення ІМП і їх розташування відносно котушок індуктивності ЕМАП при використанні способу витіснення магнітного поля в поверхневий шар ОК [9]

На рис. 2 показано: 1 – магніти; 2, 2.1, 2.2 – магнітопроводи; 3, 3.1, 3.2 – робочі ділянки збуджуючої і приймальної високочастотних котушок; 4 – неробочі ділянки збуджуючої і приймальних високочастотних котушок; 5 – протектор; 6 – ОК, 7 – акустичний екран.

Розглянемо побудову прямого роздільно – суміщеного ЕМАП зсувних хвиль із застосуванням варіанту, приведеного на рис. 2б. В цьому випадку МП залишається єдиний вихід – в напрямку збуджуючої 3.1 і приймальної 3.2 ділянок котушок індуктивності і шару металу ОК під ними.

Магнітопровід перетворювача виготовляється шихтованим з тонких пластин трансформаторної сталі розділений навпіл акустичним екраном 7.

При такій конструкції, навіть якщо імпульси когерентних завад збудяться в частині магнітопроводу 2.1, наявних над робочою збуджуючою ділянкою 3.1 високочастотної (ВЧ) котушки, вони не перейдуть в частину магнітопроводу 2.2 і не будуть зареєстровані робочою ділянкою 3.2 приймальної ВЧ котушки індуктора перетворювача. Величина когерентних завад за рахунок ефекту Баркгаузена та магнітострикційного перетворення буде мінімальною.

Виготовлений ІМП являє собою замкнуту трубчасту конструкцію прямокутної форми з магнітів товщиною 5 мм і загальною висотою 24 мм. Магніти фіксувалися по периметру окантовкою з алюмінію завтовшки 3,5 мм. З метою усунення частини когерентних завад, місця з'єднань магнітів між собою не склеювалися. Внутрішній розмір порожнини ІМП 6,5x15x24 мм<sup>3</sup>. Вона була заповнена пластинами з трансформаторної сталі товщиною 0,5 мм. Для такої конструкції ІМП величина нормального компоненти індукції магнітного поля при мінімальному зазорі 1 мм між високочастотної котушкою і ОК досягала 1,2 Тл [9].

Цілий ряд публікацій і патентів присвячені конструкціям, в основному, накладних ЕМАП, які розроблені співробітниками МНВО «СПЕКТР»: Алексіним С.Г., Бобровим В.Т., Бобровим СВ, Козловим В.Н., Сергєєвим К.Л. та ін. [11–15]. Технічний результат від цих розробок – можливість визначення текстурної анізотропії, товщини і напружено-деформованого стану конструкцій і прокату типу стрічок, смуг, труб тощо.

Група дослідників з Іжевська: Муравйов В.В., Муравйова О.В., Кокоріна Е.Н., Балобанов Е.Н. та ін. [16–19] розглянули питання формування магнітного поля підмагнічування П-подібного пристрою для прохідних ІМП і накладних джерел МП на основі постійних магнітів. При цьому стверджується, що вдалося отримати МП з індукцією до 2,7 Тл. Проведена оптимізація систем підмагнічування прохідних електромагнітно-акустичних перетворювачів об'ємних хвиль для неруйнівного контролю пруткового прокату.

Для збудження і реєстрації горизонтально поляризованих хвиль, як правило, використовують ІМП з періодичною структурою магнітів [7, 9, 20–21], рис. 3. На рис. 3 показано: 1 – ОК; 2 – магніти; 3 – провідники зі струмом; 2а – крок періодичної структури магнітів, рівний довжині порушуємо ультразвукової хвилі. Недоліками такої конструкції є значне зусилля притискання до феромагнітних ОК і сильна залежність інформаційного сигналу від зміни зазору між ОК і ЕМАП.

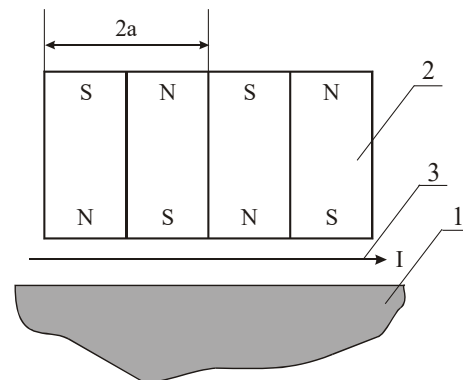


Рис. 3 – Схема збудження поверхневих хвиль або хвиль Лемба SH типу [9]

Найчастіше в установках для автоматичного контролю застосовують електромагніти значних габаритів [22] з індукцією магнітного поля, що досягає 1 Тл і більше для зазорів до 5,0 мм. При використанні постійних магнітів і електромагнітів під час контролю феромагнітних виробів виникають великі сили притягування. Для полегшення і мобільності сканування поверхні ОК застосовують ЕМАП розміщені на різних механічних пристроях [9, 22], що стежать за поверхнею ОК.

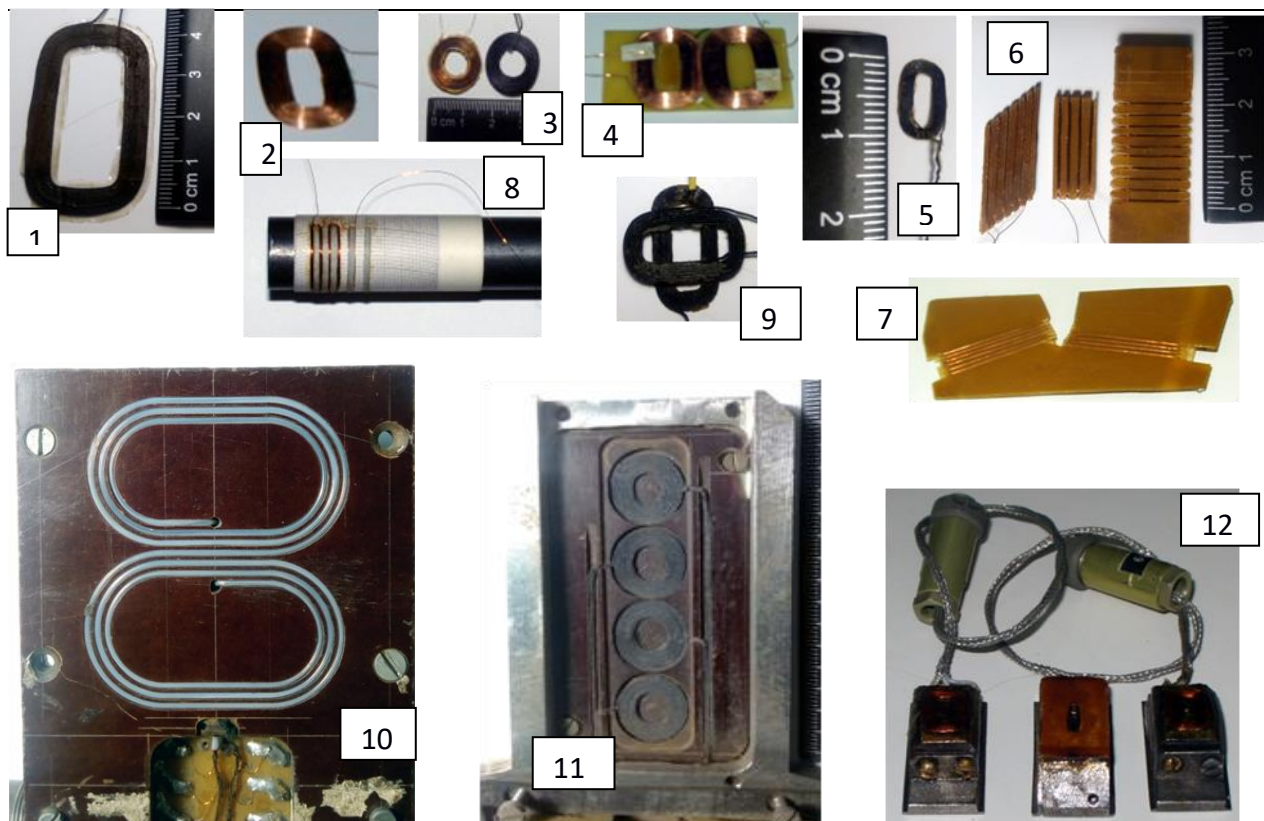


Рис.4 – ВЧ котушки індуктивності ЕМАП різного призначення [2, 9–10, 22]

З викладеного випливає необхідність оптимізації намагнічуючих систем ЕМАП для кожного конкретного випадку, що істотно ускладнює і здорожує процес розробки систем контролю і діагностики з використанням ЕМА способу збудження і прийому ультразвукових коливань.

Високочастотні котушки індуктивності ЕМАП також мають значну різноманітність конструкцій, рис.4. Їх застосовують в суміщеному, роздільно-суміщеному і в роздільному варіантах, накладні і прохідні. Вони бувають одновитковою і багатовитковою, одношарові і багатшарові. Ділянки ВЧ котушок використовують в синфазному і протишазному включенні або комбінованому, в залежності від орієнтації вектору індукції поляризувального магнітного поля. Котушки індуктивності мають різну форму: з прямолінійними і вигнутими провідниками, спіральні, еліптичні, у вигляді крил метелика, звивисті – з прямолінійними і криволінійними ділянками. Деякі види поширених ВЧ котушок ЕМАП наведені на рис. 4.

На рис. 4 показано: 1 – плоска одношарова котушка суміщеного широкозахватного ЕМАП для збудження і прийому лінійно поляризованих ультразвукових коливань нормально поверхні ОК в синфазному або протишазному включенні (визначається полярністю МП над лінійними ділянками котушки); 2 – плоска одношарова котушка суміщеного ЕМАП для збудження і прийому лінійно поляризованих ультразвукових коливань нормально поверхні ОК в синфазному або протишазному

включенні (визначається полярністю МП над лінійними ділянками котушки); 3 – плоскі одношарові котушки суміщених ЕМАП для збудження і прийому ультразвукових коливань з круговою поляризацією нормально поверхні ОК; 4 – плоскі одношарові котушки окремо – суміщеного ЕМАП для збудження і прийому лінійно поляризованих ультразвукових коливань нормально поверхні ОК; 5 – плоска одношарова міні-котушка суміщеного ЕМАП для збудження і прийому лінійно поляризованих ультразвукових коливань нормально поверхні ОК в синфазному або протишазному включенні (визначається полярністю МП над лінійними ділянками котушки); 6 – плоскі високочастотні котушки суміщених ЕМАП, кожна секція яких намотана декількома витками, для збудження і прийому хвиль Релея, Лемба або під кутом до поверхні ОК, в залежності від частоти струму живлення; 7 – плоскі високочастотні котушки роздільно-суміщеного ЕМАП, кожна секція яких намотана декількома витками, для збудження і прийому хвиль Релея або Лемба; 8 – високочастотна котушка суміщеного ЕМАП, кожна секція якої намотана декількома витками, для збудження і прийому хвиль Релея або під кутом до поверхні ОК або крутильних хвиль, в залежності від частоти струму живлення (для стрижнів і труб малого діаметра); 9 – плоскі високочастотні котушки роздільно-суміщеного ЕМАП, для збудження і прийому нормально до поверхні ОК зсувених хвиль з обертовим вектором поляризації (котушки живлять

високочастотними струмами, зсуnutими по фазі один від одного на  $90^\circ$ ), розроблено Неволіним О.В. [20]; 10 – плоска високочастотна котушка, намотана багатожильним дротом, поєднаного ЕМАП для збудження і прийому лінійно поляризованих ультразвукових коливань нормально поверхні ОК (використовується з 1983 р в установках автоматичного ультразвукового контролю рейок [22] і в портативному товщиномірі [10]); 11 – плоскі високочастотні котушки ЕМАП, намотані багатожильним проводом, для збудження і прийому зсувних ультразвукових коливань з круговою поляризацією нормально поверхні ОК (використані в 4-х каналній установці ультразвукового контролю залізничних коліс); 12 – плоскі одношарові котушки з полюсними наконечниками суміщених ЕМАП для збудження і прийому лінійно поляризованих ультразвукових коливань в 4-х каналному автоматичному товщиномірі для безшовних труб [22]. З викладеного випливає, що різноманіття конструкцій ВЧ котушок індуктивності ЕМАП також вимагає індивідуального підходу до виконання конкретних технічних завдань вимірів, контролю і діагностики у відношенні до окремого ОК, що, з одного боку, ускладнює процес їх розробки, а з іншого – дозволяє вирішувати задачу з високою ефективністю.

Слід зазначити, що істотних зрушень в розробці ЕМАП для збудження і прийому хвиль Релея і Лемба не відбулося. У більшості випадків в ЕМАП, використовуваних для діагностики, застосовуються традиційні високочастотні котушки, рис.4.6–4.7, типу «меандр» [2, 9, 23]. Це говорить про вдале науково-технічне рішення, яке дає можливість реалізувати багато технічних і практичних завдань – контролювати вироби з великими площами: листи, труби різного діаметру, ємності тощо. Недоліком таких перетворювачів є необхідність у виготовленні набору перетворювачів налаштованих на одну конкретну частоту ультразвукових коливань. Наприклад в роботі [23] для досліджень алюмінієвої пластини товщиною 5 мм хвилями Лемба застосували дванадцять різних ЕМАП.

Помітного практичного застосування ЕМАП для збудження і прийому ультразвукових хвиль Релея і Лемба типу SH мегагерцового діапазону в літературі не виявлено. Хоча дослідження в цій області тривають. Швидше за все, це пов'язано зі складною структурою системи намагнічування таких перетворювачів [2, 7] і надзвичайно сильним впливом зміни величини зазору на чутливість контролю.

Успішно тривають розробки ЕМАП з введенням ультразвукових імпульсів в обсяг ОК під кутом. Мишкін А.В. [24] досліджував діаграми спрямованості похилих перетворювачів і показав, що на рівень бічних пелюсток істотно впливає ширина елемента високочастотної котушки і величина зазору між ЕМАП і ОК. Він зробив висновок, що слід шукати компроміс між досягненням необхідної чутливості і необхідною формою діаграми спрямованості.

Подальше просування в розробках похилих ЕМАП знайшло свій розвиток у створенні фазованих решіток. Мишкін А.В. [24] розвинув підхід з моделювання ультразвукових полів багатоеlementних ЕМАП на базі рішень для засереджених джерел випромінювання. При цьому враховані як електродинамічний так і магніострикційні механізми ЕМА перетворення, які визначають діаграми спрямованості ЕМАП.

ЕМА перетворювачі також використовуються для прийому ультразвукових імпульсів, збуджених іншими джерелами, наприклад за рахунок акустичної емісії. Ряд авторів запропонували використовувати ЕМАП для реєстрації коротких ультразвукових імпульсів збуджених в металі ємнісними перетворювачами [25] або лазером [26] при виконанні високоточних вимірювань фізико-механічних характеристик матеріалів ОК.

Помітні досягнення відбулися в області розробки ЕМАП для товщинометрії феромагнітних металовиробів з діелектричними покриттями [10, 27], в якому за рахунок використання ВЧ котушки в формі «крил метелика», рис.5, і складеного подовженого постійного магніту вдалося збільшити робочий зазор (товщину діелектричного покриття) між перетворювачем і поверхнею металу до 10 мм. На рис. 5 наведено схему розробленого перетворювача.

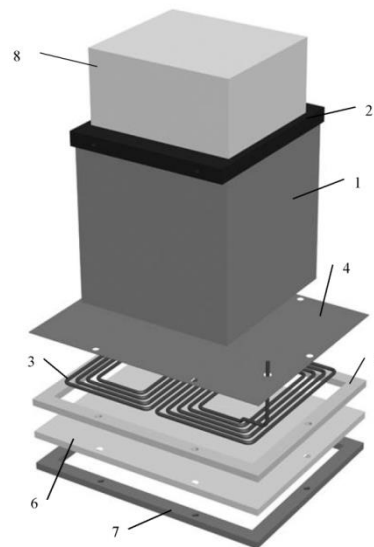


Рис. 5 – Конструкція ЕМАП для контролю ОК з діелектричним покриттям товщиною до 10 мм [27]

Корпус перетворювача є розбірним (на рисунку не показаний). Потужний постійний магніт 1 на основі кераміки NeFeV для підвищення індукції поляризуючого магнітного поля в поверхні виробу фіксується за допомогою феромагнітної пластини-магнітопроводу 2. Магніт 1 відділяється від ВЧ котушки 3 екрануючою пластинною 4, виконаної, наприклад, з латуні типу ЛС69 товщиною 0,2 мм. Вона необхідна для виключення збудження ультразвукових імпульсів когерентних завод в об'ємі магніту 1. Джгут провідників котушки 3 поміщається в окантовку 5 з діелектрика, наприклад

склотекстоліту. Окантовка 5 з'єднується з протектором 6 з склотекстоліту, після чого котушка 3 заливається клеєм – це запобігає її пошкодженню через механічні мікрозміщення, що виникають під час роботи. На протекторі 6 закріплюється фіксуєча окантовка 7 з латуні. Розроблений резонансний ЕМАП був виготовлений і випробуваний на катаних і безперервно вилитих зразках з феромагнітних сталей товщиною до 100 мм. Діелектричне покриття імітували прокладками з склотекстоліту. Живлення ЕМА перетворювача здійснювалося генератором [28], який формував у індукторі височастотні пакетні імпульси струму величиною до 60 А. Напруга на індукторі досягало 3 кВ (при зазорі 10 мм).

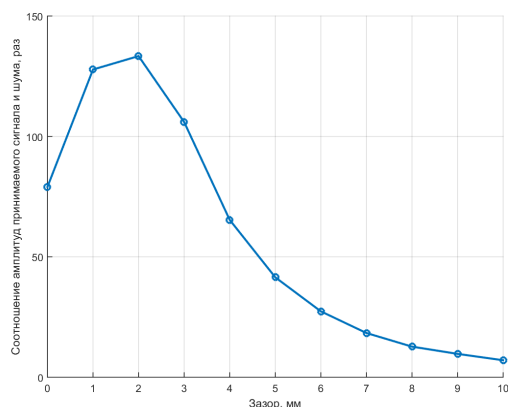


Рис. 6 – Залежність корисного сигналу ЕМАП від товщини діелектричного покриття [27]

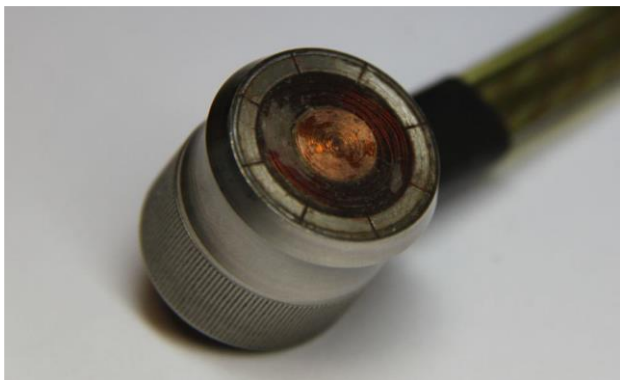


Рис. 7 – ЕМАП з імпульсним ІМП [11]

Тривалість зондувальних імпульсів регулювали в межах 1...10 періодів частоти заповнення в пакеті. Індукція поляризуєчого магнітного поля при зазорі 10 мм досягала 0,6 Тл. Досліджено діапазон ультразвукових частот в межах 1,5...2,5 МГц. Налаштування резонансної частоти ЕМАП здійснювали при зазорі 2 мм, що дозволяло отримати відносно невеликі зміни амплітуд прийнятого корисного сигналу і шуму при зміні товщини покриття на  $\pm 1$  мм, що є важливим при автоматичному контролі з заданим повітряним зазором між перетворювачем і металом. Типова залежність амплітуди донного сигналу від товщини покриття наведена на рис. 6.

Аналіз дослідженої залежності показав, що при зазорі 10 мм з прозорих з точки зору акустики металів, без застосування методів обробки інформації, співвідношення амплітуд корисного сигналу і шуму досягає 7 разів, що цілком достатньо для товщинометрії.

Проте, незважаючи на високу чутливість контролю, цей перетворювач сильно притискається до поверхні ОК, що приводить до стирання протектора. Окрім того, ручне сканування виробу практично неможливе.

Ряд дослідників [4, 11, 21, 29-30] пропонують виключити недолік ЕМАП, пов'язаний з необхідністю використання значних величин індукції поляризуєчого магнітного поля шляхом використання імпульсного магнітного поля. Поляризуєче магнітне поле ІМП створюється прямокутним імпульсом струму заданої тривалості, пропущеним через котушки індуктивності різних конструкцій, що в більшості випадків містять сердечник. Автори стверджують, що можна сформувати МП з індукцією, що перевищує в кілька разів поля, отримані за допомогою постійних магнітів. Крім того, автори роботи [21] стверджують, що при імпульсному підмагнічуванні виконання височастотної котушки двошаровою дозволяє збільшити інформаційний сигнал в 2,3 рази.

У дисертаційній роботі Альохіна С.Г. [11] (2013) надано детальну інформацію про розроблений ЕМАП, рис. 7, з імпульсним джерелом магнітного поля. ІМП виконаний з броньованим розрізним осердям 2, в якому розміщена котушка індуктивності 1, рис. 8 (3 – ОК). Оскільки індуктивність такого джерела виявилася значною, то тривалість імпульсу струму, який живить ЕМАП досягала 1 мс, що є суттєвим недоліком. Очевидно, що тривалість імпульсу живлення перетворювача необхідно скорочувати.

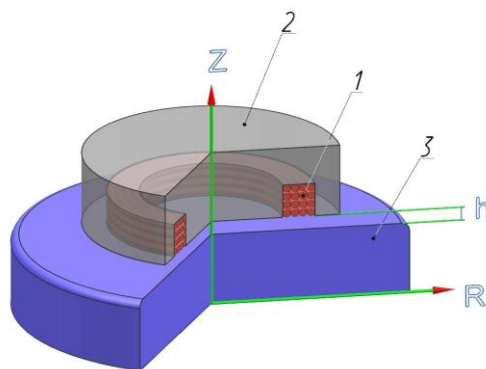


Рис. 8 – Схема імпульсного ІМП [11]

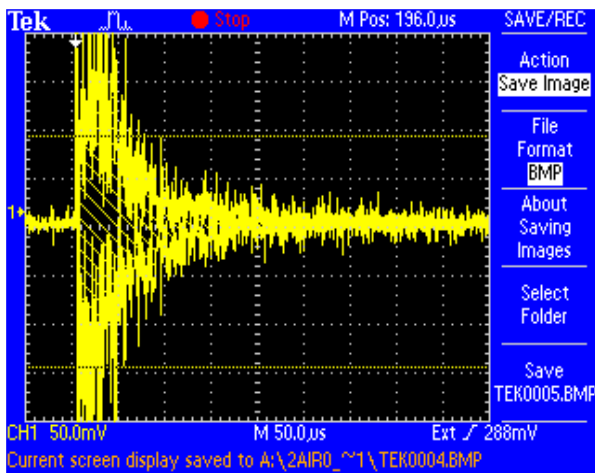


Рис. 9 – Перешкоди Баркгаузена, які обумовлені дією переднього фронту імпульсу живлення ІМП [11]

Крім того, наявність броньованого сердечника призвело до збудження шумів Баркгаузена значною амплітуди і тривалості, рис. 9, що помітно знижує ефективність роботи ЕМАП з імпульсним ІМП такої конструкції. З викладеного випливає перспективність застосування імпульсних ІМП з мінімальною індуктивністю його котушки і мінімальним обсягом феромагнітного сердечника або без сердечника.

#### Висновки

1. Аналіз літературних джерел показав, що підвищення чутливості електромагнітно-акустичного контролю за рахунок збільшення величини індукції постійного поляризованого магнітного поля значно ускладнює сканування об'єкту контролю та веде до прискореного виходу з ладу ЕМА перетворювачів.

2. Підвищення чутливості електромагнітно-акустичного контролю за рахунок збільшення потужності генераторів зондуючих імпульсів обмежено можливостями височастотних котушок індуктивності ЕМА перетворювачів за причини їх робочої імпульсами високої напруги.

3. Встановлена можливість суттєвого підвищення чутливості ЕМАП за рахунок використання імпульсних магнітних полів при умові виключення збудження когерентних і інших завад від ефекту Баркгаузена та магнітострикційного перетворення електромагнітної енергії в ультразвукову.

4. Використання імпульсних магнітних полів дозволяє виключити пошкодження ЕМА перетворювачів та зменшити їх стирання об поверхню об'єкту контролю.

#### Список літератури

1. Плеснецов С. Ю., Сучков Г. М., Корж А. И., Суворова М. Д. Новые теоретические исследования и разработки в области электромагнитно-акустического преобразования (обзор) // *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*. – 2018. – №2. – С. 24–31.
2. 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.
3. Сазонов Ю. И. (2014) 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.

4. Чабанов В. Е., Жуков В. А. (2013) Особенности ультразвукового контроля с применением электромагнитно-акустических преобразователей. В мире неразрушающего контроля, 1, 36–43.
5. Судакова К. В., Казюкевич И. Л. О повышении эффективности контроля качества металлургической продукции // В мире неразрушающего контроля. № 3. С. 8–10.
6. Аббакумов К. Е. К вопросу об оптимизации параметров электромагнитно-акустических излучателей и приемников // *Известия ЛЭТИ*. – 1975. – № 168. – С. 19–26.
7. 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.
8. 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. – Харьков: Издательство «Оберіг». – 2019 – 556 с.
9. Мигущенко Р. П., Сучков Г. М., Петрищев О. Н., Десятниченко А. В. Теория и практика электромагнитно-акустического контроля. Часть 5. Особенности конструирования и практического применения ЭМА устройств ультразвукового контроля металлоизделий: монография. Харьков: ТОВ «Планета-принт», 2016 – 230 с.
10. Десятниченко О. В. Электромагнитно-акустичний товщинімір для контролю металовиробів з діелектричними покриттями. Автореф. дис. канд. техн. наук. – Харьков: «Моделіст», 2015 – 20 с.
11. Альохін С. Г. Товщинометрія металоконструкцій на основі електромагнітно-акустичного перетворення в імпульсному магнітному полі: канд. дис.-М.: МНВО «Спектр», 2013. 95 с.
12. Самокрутов А. А., Шевальдыкин В. Г., Бобров В. Т., Сергеев К. Л., Алехин С. Г. «Электромагнитно-акустический преобразователь». Патент РФ на изобретение №2343475 Бюл. изобр. – 2009. – №1.
13. Самокрутов А. А., Бобров В. Т., Шевальдыкин В. Г., Сергеев К. Л., Козлов В. Н., Алехин С. Г. «Магнитная система электромагнитно-акустического преобразователя». Патент РФ на изобретение №2350943 Бюл. изобр., 2009, №9.
14. Электромагнитно-акустический преобразователь. Самокрутов А. А., Бобров В. Т., Шевальдыкин В. Г., Алехин С. Г., Козлов В. Н. Патент на изобретение RUS 2334981 20.02.2007.
15. Алехин С. Г., Самокрутов А. А., Бобров В. Т., Бобров С. В., Сергеев К. Л. Моделирование магнитных систем ЭМА-преобразователей для возбуждения ультразвуковых волн. *Контроль. Диагностика*. – 2013. – №7 – С. 12–18.
16. Муравьев В. В. К расчету параметров магнитной системы электромагнитно-акустического преобразователя / В. В. Муравьев, В. А. Стрижак, Е. Н. Балобанов // *Интеллектуальные системы в производстве*. – 2011. – № 1. – С. 197–205.
17. Электромагнитно-акустический преобразователь. Патент РФ на полезную модель №134658 от 31.05.2013. / В. В. Муравьев, О. В. Муравьева, В. А. Стрижак, А. В. Пряхин, Е. Н. Балобанов; опубл. 20.11.2013, Бюл. № 32.
18. Электромагнитно-акустический преобразователь. Патент РФ на полезную модель №127931 от 23.11.2012. / В. В. Муравьев, О. В. Муравьева, В. А. Стрижак, А. В. Пряхин, Е. Н. Балобанов, Л. В. Волкова; опубл. 10.05.2013, Бюл. № 13. – 6 с.
19. Муравьева О. В. Оптимизация систем подмагничивания проходных электромагнитно-акустических преобразователей объемных волн для неразрушающего контроля пруткового проката / О. В. Муравьева, В. В. Муравьев, Е. Н. Кокорина, В. Д. Стерхов, Д. В. Малютин // *Датчики и системы*. 2013. – №2. – С. 2–9.
20. Астаф'єв А. Н., Неволін О. В., Мамай А. М., Мутяченко О. В., Астаф'єв Н. А., Неволін В. О. Універсальна приставка для стандартних ультразвукових дефектоскопів і товщинімірів // *дефектоскопії*. 2006. – №7. – С. 73–82.

21. Ohtsuka Y., Yoshimura T., Ueda Y. P2E-6 New Design of Electromagnetic Acoustic Transducer for Precise Determination of Defect. 2007 IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings. Pages: 1609 – 1612, DOI: 10.1109 / ULTSYM.2007.405.
  22. Сучков Г. М., Алексеев Е. А., Захаренко В. В. Енерго- і ресурсозберігаючі прилади та технології неруйнівного контролю // Технічна діагностика і неруйнівний контроль. 2006. – №4. – С. 29–34.
  23. WilcoxPD; 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. Year: 2005, Volume: 52, Issue: 12. IEEE Journals & Magazines. Pages: 2370 – 2383, DOI: 10.1109 / TUFFC.2005.1563281.
  24. Мишкін А. В. Вплив конструктивних параметрів багатоселементних фазованих перетворювачів на формування акустичних полів: Автореф. канд. дис. Іжевськ: ІжГТУ, 2015. – 22 с.
  25. Мигачев С. А., Куркин М. И, Смородинский Я. Г. Безконтактное возбуждение звука в металле видеоимпульсами электрического поля // Дефектоскопия. – 2016. – №. 11. – С. 48–53.
  26. Gurevich, S.Yu., Petrov, Yu.V., Shusharin, AV, Golubev, EV. Analysis of ultrasonic waves excited in a metal plate by nanosecond laser pulses // Russian Journal of Nondestructive Testing. №45 (4), P. 247–251.
  27. Мігущенко Р. П., Сучков Г. М., Радев Х. К., Петрищев О. Н., Десятниченко А. В. Електромагнітно-акустичний перетворювач для ультразвукової товщинометрії феромагнітних металовиробів без видалення діелектричного покриття // Технічна електродінаміка. – 2016. – №2 – С. 78–82.
  28. Plesnetsov S.Yu., Petrishchev ON, Mygushchenko RP, Suchkov GM, Sotnik SV, Kropachek O.Yu. Powerful sources of pulse high-frequency electromechanical transducers for measurement, testing and diagnostics // Электротехника и электромеханика. 2018. – №2. – С. 31–35.
  29. Подолян А. А. Формирование магнитного поля с заданными характеристиками в ЭМА преобразователях систем неразрушающего контроля промышленного оборудования // Методы и приборы контроля качества. – 2006. – Вып. 17. – С. 18–21.
  30. Тымчик Г. С. Формирование импульсов специальной формы для электромагнитных акустических преобразователей / Г.С. Тымчик, А.А. Подолян // Вестник НТУУ «КПИ». Серия «Приборостроение». – 2013. – Вып. 45. – С. 64–69.
- References (transliterated)**
1. Plesnecov S. Yu., Suchkov G. M., Korzh A. I., Suvorova M. D. Novye teoreticheskie issledovaniya i razrabotki v oblasti elektromagnitno-akusticheskogo preobrazovaniya (obzor) // Tehnicheskaya diagnostika i nerazrushayushij kontrol. – 2018. – No2. – P. 24–31.
  2. Suchkov G. M., Plesnecov S. Yu., Mesheryakov S. Yu., Yudanov N. N. Novye razrabotki elektromagnitno-akusticheskikh preobrazovatelej. (obzor) // Tehnicheskaya diagnostika i nerazrushayushij kontrol. – 2018. – No3. – P. 27–34.
  3. Sazonov Yu. I. (2014) Elektromagnitno-akusticheskie efekty v kondensirovannyh 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.
  4. Chabanov V. E., Zhukov V. A. (2013) Osobennosti ultrazvukovogo kontrolya s primeneniem elektromagnitno-akusticheskikh preobrazovatelej. V mire nerazrushayushego kontrolya, 1, 36–43.
  5. Sudakova K.V., Kazyukevich I.L. O povyshenii effektivnosti kontrolya kachestva metallurgicheskoy produkcii // V mire nerazrushayushego kontrolya. No 3. P. 8–10.
  6. Abbakumov K.E. K voprosu ob optimizacii parametrov elektromagnitno-akusticheskikh izluchatelej i priemnikov // Izvestiya LETI. – 1975. – No 168. – P. 19–26.
  7. Nerazrushayushij kontrol: Spravochnik: V 7 t. Pod obsh. red. V. V. Klyueva. T.3: Ultrazvukovoj kontrol / I. N. Ermolov, Yu. V. Lange. – Moscow: Mashinostroenie, 2004. – 864 p.
  8. 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. – Kharkiv: Vidavnistvo «Oberig». – 2019 – 556 p.
  9. Migushenko R. P., Suchkov G. M., Petrishev O. N., Desyatnichenko A. V. Teoriya i praktika elektromagnitno-akusticheskogo kontrolya. Chast 5. Osobennosti konstruirovaniya i prakticheskogo primeneniya EMA ustrojstv ultrazvukovogo kontrolya metalloizdelij: monografiya. Kharkiv: TOV «Planeta-print», 2016 – 230 p.
  10. Desyatnichenko O. V. Elektromagnitno-akustichna tovshinometriya dlya kontrolyu metalovirobiv z dielektrichnimi pokrittyami. Avtoref. dis. kand. tehn. nauk. – Kharkiv: «Modelist», 2015 – 20 p.
  11. Alohin S. G. Tovshinometriya metalokonstrucij na osnovi elektromagnitnoyi-akustichnogo peretvorenniya v impulsnomu magnitnomu poli: kand. dis. – Moscow: MNVO «Spektr», 2013. 95 p.
  12. Samokrutov A. A., Sh evaldykin V. G., Bobrov V. T., Sergeev K.L., Alehin S.G. «Elektromagnitno-akusticheskij preobrazovatel». Patent RF na izobretienie No2343475 Byul. izobr., 2009, No1.
  13. Samokrutov A.A., Bobrov V.T., Shevaldykin V.G., Sergeev K.L., Kozlov V.N., Alehin S.G. «Magnitnaya sistema elektromagnitno-akusticheskogo preobrazovatelya». Patent RF na izobretienie No2350943 Byul. izobr., 2009, No9.
  14. Elektromagnitno-akusticheskij preobrazovatel. Samokrutov A.A., Bobrov V.T., Shevaldykin V.G., Alehin S.G., Kozlov V.N. Patent na izobretienie RUS 2334981 20.02.2007.
  15. Alehin S.G., Samokrutov A.A., Bobrov V.T., Bobrov C.B., Sergeev K.JI. Modelirovanie magnitnyh sistem EMA-preobrazovatelej dlya vzbuzhdeniya ultrazvukovyh voln. Kontrol. Diagnostika – 2013 – No7 – P. 12– 18.
  16. Muravev V.V. K raschetu parametrov magnitnoj sistemy elektromagnitno- akusticheskogo preobrazovatelya / V.V. Muravev, V.A. Strizhak, E.N. Balobanov // Intellektualnye sistemy v proizvodstve. – 2011. – No 1. – P. 197–205.
  17. Elektromagnitno-akusticheskij preobrazovatel. Patent RF na poleznuyu model No134658 ot 31.05.2013. / V. V. Muravev, O.V. Muraveva, V.A. Strizhak, A.V. Pryahin, E.N. Balobanov; opubl. 20.11.2013, Byul. N 32.
  18. Elektromagnitno-akusticheskij preobrazovatel. Patent RF na poleznuyu model No127931 ot 23.11.2012. / V.V. Muravev, O.V. Muraveva, V.A. Strizhak, A.V. Pryahin, E.N. Balobanov, L.V. Volkova; opubl. 10.05.2013, Byul. N 13. – 6 s.
  19. Muraveva O. V. Optimizaciya sistem podmagnichivaniya prohodnyh elektromagnitno-akusticheskikh preobrazovatelej obemnyh voln dlya nerazrushayushego kontrolya prutkovogo prokata / O.V. Muraveva, V. V. Muravev, E. N. Kokorina, V. D. Sterhov, D. V. Malyutin // Datchiki i sistemy. 2013. – No2. – P. 2–9.
  20. Astaf'ev A.N., Nevolin O. V., Mamaj A. M., Mutyachenko O. V., Astaf'ev N. A., Nevolin V. O. Universalna pristavka dlya standartnih ultrazvukovyh defektoskopiv i tovshinomiriv // defektoskopiyi. 2006. – No7. – P. 73–82.
  21. Ohtsuka Y., Yoshimura T., Ueda Y. P2E-6 New Design of Electromagnetic Acoustic Transducer for Precise Determination of Defect. 2007 IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings. Pages: 1609 – 1612, DOI: 10.1109 / ULTSYM.2007.405.
  22. Suchkov G.M., Aleksyeyev E.A., Zaharenko V.V. Energo- i resursozberigayuchi priladi ta tehnologiyi nerujnivnogo kontrolyu // Tehnichna diagnostika i nerujnivnij kontrol. 2006. – No4. – P. 29–34.
  23. WilcoxPD; 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. Year: 2005, Volume: 52, Issue: 12. IEEE Journals & Magazines. Pages: 2370 – 2383, DOI: 10.1109 / TUFFC.2005.1563281.
  24. Mishkin A.V. Vpliv konstruktivnih parametrov bagatoelementnih fazovanih peretvoryuvachiv na formuvannya akustichnih poliv: Avtoref. kand. dis. Izhevsk: IzhGTU, 2015. 22 p.
  25. Migachev S. A., Kurkin M. I, Smorodinskij Ya. G. Bezkontaktное возбуждение звука в металле видеоимпульсами электрического поля // Дефектоскопия. – 2016. – No. 11. – P. 48–53.



26. Gurevich, S.Yu., Petrov, Yu.V., Shusharin, AV, Golubev, EV. Analysis of ultrasonic waves excited in a metal plate by nanosecond laser pulses // Russian Journal of Nondestructive Testing. No45 (4), P. 247–251.
27. Migushenko R. P., Suchkov G. M., Radev H. K., Petrishev O. N., Desyatnichenko A. V. Elektromagnitno-akustichnij peretvoryuvach dlya ultrazvukovoyi tovshinometriyi feromagnetnih metalovirobiv bez vidalennya dielektrichnogo pokrittya // Tehnichna elektrodinamika. – 2016. – No2 – P. 78–82.
28. Plesnetsov S.Yu., Petrishchev ON, Mygushchenko RP, Suchkov GM, Sotnik SV, Kropachek O.Yu. Powerful sources of pulse high-frequency electromechanical transducers for measurement, testing and diagnostics // Elektrotehnika i elektromehanika. 2018. – No2. – P. 31–35.
29. Podolyan A. A. Formirovanie magnitnogo polya s zadannymi harakteristikami v EMA preobrazovatelyah sistem nerazrushayushogo kontrolya promyshlennogo oborudovaniya // Metody i pribory kontrolya kachestva. – 2006. – Vyp. 17. – P. 18–21.
31. Tymchik G. S. Formirovanie impulsov specialnoj formy dlya elektromagnitnyh akusticheskikh preobrazovatelej / G.S. Tymchik, A.A. Podolyan// Vestnik NTUU «KPI». Seriya «Priborostroenie». – 2013. – Vyp. 45. – P. 64–69.

Надійшла (received) 08.12.2019

*Відомості про автора / Сведения об авторе / About the Author*

**Салам Буссі (Салам Буссу, Salam Bussey)** – аспірантка кафедри комп'ютерних та радіоелектронних систем контролю та діагностики Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна

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

УДК 681.586

**Ю. О. СМОЛІН****РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ДАТЧИКА ТИСКУ КОМП'ЮТЕРНОЇ СИСТЕМИ ДІАГНОСТИКИ ДВЗ**

Розглянуто основні вимоги до сучасних датчиків. Виділено параметри, які найбільш суттєво впливають на якісні характеристики датчиків. Визначено частину недоліків датчиків, що можна компенсувати за рахунок обчислювальних і логічних можливостей комп'ютера. Наведено структурну схему розробленого датчика, розгорнення зовнішньої поверхні тензометричного стакану зі схемою наклеювання тензорезисторів й схемою їх розпаювання, конструкцію датчика і його опис, креслення мембрани, а також необхідні характеристики датчика тиску. Розглянуто процес одержання градуйованих характеристик. Обрані засоби контролю і вимірювання та наведені їх характеристики. Наведено розроблену структурну схему експериментальної установки для визначення градуйованих характеристик. Отримані й наведені градуйовані характеристики первинного вимірювального перетворювача, підсилювача, АЦП і цифрового датчика тиску. Проведено розрахунок чутливості датчика.

**Ключові слова:** датчик тиску, первинні перетворювачі, експериментальна установка, градуйовані характеристики, чутливість датчика.

**Ю. А. СМОЛІН****РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ДАТЧИКА ДАВЛЕНИЯ КОМПЬЮТЕРНОЙ СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ ДВС**

Рассмотрены основные требования к современным датчикам. Выделены параметры, которые наиболее существенно влияют на качественные характеристики датчиков. Определена часть недостатков датчиков, которые можно компенсировать за счет вычислительных и логических возможностей компьютера. Приведена структурная схема разработанного датчика, развертка внешней поверхности тензометрического стакана, схема наклеивания тензорезисторов и схема их распайки, конструкция датчика и его описание, чертеж мембраны, а также требуемые характеристики датчика давления. Рассмотрен процесс получения градуировочных характеристик. Выбраны средства контроля и измерения и приведены их характеристики. Приведена разработанная структурная схема экспериментальной установки для определения градуировочных характеристик. Получены и приведены градуировочные характеристики первичного измерительного преобразователя, усилителя, АЦП и цифрового датчика давления. Проведен расчет чувствительности датчика.

**Ключевые слова:** датчик давления, первичные преобразователи, экспериментальная установка, градуировочные характеристики, чувствительность датчика.

**Yu. A. SMOLIN****RESEARCH RESULTS OF PRESSURE SENSOR CHARACTERISTICS COMPUTER ICE DIAGNOSTIC SYSTEMS ICE**

The basic requirements for modern sensors are considered. The parameters that have the most significant effect on the qualitative characteristics of the sensors are selected. The part of flaws of sensors that can be compensated by computational and logic capabilities of the computer is determined. The structural scheme of the developed sensor, the unwrapping of the outer surface of the strain gauge glass with the scheme of strain gauge stickers and their decomposition scheme, the design of the sensor and its description, the drawing of the membrane, as well as the necessary characteristics of the pressure sensor are provided. In this case, the main attention is paid to the circuit of the primary measuring transducer, the method of setting the strain gauge, the circuit of their connection and the power supply. A detailed description of all mechanical components of the sensor and its cooling method is given. The process of obtaining the graded characteristics is considered. The means of control and measurement and their characteristics are selected. The developed structural scheme of the experimental setup for the determination of the graded characteristics is given. The graduated characteristics of the primary measuring transducer, amplifier, ADC and digital pressure sensor are derived and presented. The sensitivity of the sensor is calculated.

**Key words:** pressure sensor, primary transducers, experimental setup, graded characteristics, sensitivity of the sensor.

**Вступ.** Розвиток сучасних засобів комп'ютерних та радіоелектронних систем контролю та діагностики, в тому числі різних інформаційних та автоматизованих систем, немисливо без використання високоточних та надійних датчиків.

Не є виключенням і датчики тиску, які застосовуються у двигунах внутрішнього згорання (ДВЗ) [1]. Вони створюються на базі пристроїв радіоелектроніки, таких як операційні підсилювачі, вимірювальні мости, аналого-цифрові перетворювачі та ін., але основною їх частиною є первинний вимірювальний перетворювач. Тому визначити і представити в цифровій формі тиск в циліндрі ДВЗ можна тільки за допомогою спеціально розроблених засобів вимірювань на базі радіоелектронних пристроїв [2]. Такий цифровий датчик для вимірювання тиску в циліндрах ДВЗ було розроблено в НТУ «ХП».

**Постановка проблеми.** Одним із найважливіших параметрів робочого процесу ДВЗ є тиск в циліндрі двигуна. Тому до складу всіх науково-дослідницьких та випробувальних комп'ютерних систем діагностики ДВЗ надходить датчик тиску в циліндрі ДВЗ, за допомогою якого в діагностичній системі створюється окремий канал вимірювання із своїми особливостями та характеристиками, які, в свою чергу, пов'язані між собою і вимагають при дослідженні комплексного підходу [3]. Тому завжди існує необхідність проводити виміри параметрів ДВЗ при різних видах випробувань, за допомогою комп'ютерних систем контролю та діагностики, з точністю, що регламентується ДСТУ.

**Мета роботи.** Експериментальним шляхом визначити градуйовані характеристики окремих вузлів цифрового датчика тиску та датчика в цілому й

оцінити спроможність його використання в комп'ютерних системах контролю та діагностики ДВЗ.

**Основна частина.** Основними вимогами до сучасних датчиків є [2, 3, 4]:

а) високі якісні характеристики: чутливість, точність, лінійність, відтворюваність або повторюваність показань, швидкість відгуку, взаємозамінність, відсутність гістерезису й велике відношення сигнал-шум;

б) висока надійність: тривалий термін служби, стійкість дозовнішнього середовищу, безвідмовність у роботі;

в) технологічність: малі габарити й маса, простота конструкції, низька собівартість.

Звичайно, виготовлення датчиків, що задовольняють всім перерахованим тут вимогам, представляє собою значні труднощі. Однак при роботі датчиків в складі комп'ютерних систем частину недоліків датчиків можна компенсувати за рахунок обчислювальних і логічних можливостей комп'ютера. Зокрема, за допомогою комп'ютера лінеаризується нелінійна характеристика датчика; придушуються шуми датчика; коректується чутливість і точка нуля відліків, які звичайно змінюються при тривалій експлуатації; компенсується вплив температури навколишнього середовища; виробляється автоматична діагностика датчиків.

Структурна схема цифрового датчика тиску, призначеного для виміру тиску в циліндрі ДВЗ наведена на рис. 1.

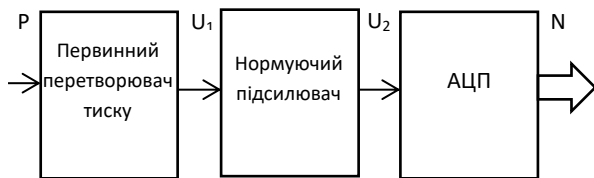


Рис. 1 – Структурна схема датчика тиску

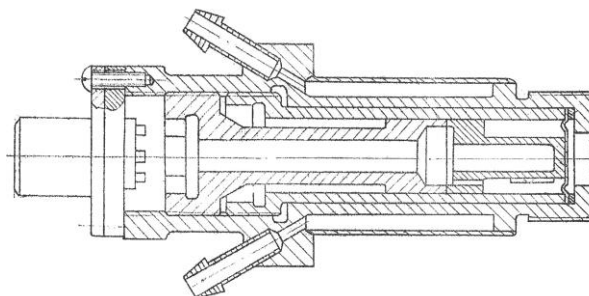


Рис. 3 – Конструкція датчика тиску

У нижньому торці датчика є отвір, що закривається мембраною, виштампуваною з аркуша нержавіючої сталі зі сплаву EI-702, на якій наклеєні тензорезистори. Мембрана передає тиск газів на тензостакан й охороняє його від безпосереднього зіткнення з робочою сумішшю й газами.

Натискний гвинт забезпечує ущільнення між дном корпусу й мембраною через прокладку.

У якості первинного вимірювального перетворювача (ПВП) тиску, застосовується тензорезистивний перетворювач. Такий перетворювач являє собою два активних плівкових тензорезистори типу КФ4 наклеєних клеєм ВР-10 на зовнішню поверхню тензостакану, як це показано на рисунку 2. Тензорезистори включені в суміжні плечі мосту постійного струму й наклеєні під кутом в  $90^\circ$ , так що один з них піддається розтягнанню, інший – стиску при деформації тензостакану. Тензорезистори утворюють напівміст, підключений через рознімач Х1 до зовнішнього напівмосту. У такий спосіб утворюється нерівновагий міст постійного струму, що забезпечує високу чутливість і гарну лінійність градууювальної характеристики. Міст живиться стабілізованим джерелом живлення й забезпечує на виході, при тисках у діапазоні  $0 \div 15$  МПа, напругу в межах  $0 \div 70$  мВ.

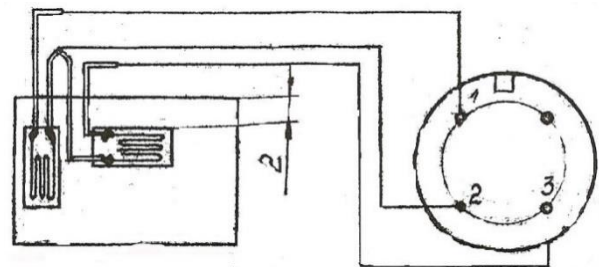


Рис. 2. – Розгорнення зовнішньої поверхні тензометричного стакану зі схемою наклеєної тензорезисторів й схемою розпаювання

Пропонована конструкція датчика тиску наведена на рисунку 3. Датчик являє собою циліндричний металевий корпус, виконаний з високоякісної сталі СТ40Х. У нижній частині корпусу є різьблення, за допомогою якої корпус датчика ввертається в отвір у стінці циліндра камери згоряння. По нижньому торці корпусу, за допомогою мідної відпаленої шайби відбувається ущільнення, що запобігає прориву газів з камери згоряння.

Спеціальний гвинт задає початкове зусилля притиснення тензостакану до мембрани, забезпечуючи таким чином, деяку незначну початкову деформацію тензостакану.

У верхній частині корпусу на його торці закріплений за допомогою гвинтів чотириконтактний рознімач, до якого, у відповідності зі схемою

розпаювання, наведеної на рис. 2, приєднуються виводи тензорезистивного напівмосту.

Уся ця конструкція розміщена усередині спеціального металевго корпусу. При цьому утворюється внутрішня порожнина, що заповнюється проточною водою й, що служить для охолодження датчика. Вода підводиться за допомогою шланга від зовнішнього джерела через штуцер. Відвід охолодної води здійснюється через другий штуцер, також з'єднаний із внутрішньою порожниною.

Креслення мембрани, що безпосередньо деформується в датчику під впливом тиску, і на яку наклеюється тензорезистори, показане на рис. 4.

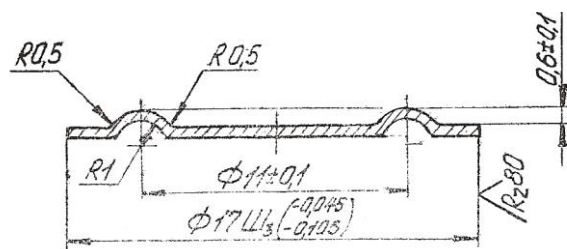


Рис. 4 – Мембрана

Основні вимагані характеристики й параметри датчика тиску наведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Необхідні характеристики датчика тиску

Характеристики і параметри	Числові значення
Границі зміни вхідного сигналу:	
– на вході датчика, МПа	0÷15
– на вході підсилювача, мВ	0÷100
– на вході АЦП, В	0÷10
Робочий діапазон вхідних сигналів по частоті, кГц	0÷5
Число розрядів вихідного коду АЦП	10
Основна статична наведена похибка датчика, не більш, %	±2,5
Динамічна похибка при максимальній швидкості зростання напруги $10^{-2} \frac{В}{мс}$ , не більш, %	1

Основною характеристикою датчика є його градувальна характеристика, тобто залежність вихідного цифрового сигналу  $N$  від вхідної напруги  $P$ , представлена у вигляді графіка [5]. Отже, градувальною характеристикою датчика є залежність  $N = f(P)$ . Крім того, кожний з перетворювачів, що надходить до складу датчика (первинний тензорезистивний перетворювач, підсилювач і АЦП) має свою градувальну характеристику.

Для первинного тензорезистивного перетворювача тиску це залежність  $U_1 = f(P)$ . Для підсилювача – залежність  $U_2 = f(U_1)$ . Для АЦП –  $N = f(U_2)$ . Ці залежності також важливі для визначення параметрів датчика. Важливою характеристикою є також чутливість.

Тобто датчик тиску, у принципі, може характеризуватися трьома приватними градувальними характеристиками:

- первинного вимірювального перетворювача;
- підсилювача;
- АЦП.

Процес одержання кожної градувальної характеристики складається із двох операцій: подачі фіксованого сигналу на вході й реєстрація вихідного значення.

У такий спосіб для одержання градувальних характеристик необхідно:

а) для градувальної характеристики первинного вимірювального перетворювача тиску:

- подавати на вхід різні тиски в межах 0÷15 МПа;
- фіксувати на виході перетворювача відповідні значення напруг  $U_1$ ;

б) для градувальної характеристики підсилювача:

- подавати на вхід підсилювача різні значення напруги  $U_1$  (у діапазоні виміру, отриманому в результаті першого дослідження);

- фіксувати на виході підсилювача напруги  $U_2$ ;

в) для градувальної характеристики АЦП:

- подавати на вхід АЦП різні значення напруги  $U_2$  (у діапазоні виміру, отриманому в результаті другого дослідження);

– фіксувати на виході АЦП відповідний вихідний код;

г) для одержання градувальної характеристики датчика:

- подавати на вхід датчика різні тиски  $P$  (у межах 0÷15 МПа);

- фіксувати відповідний код на виході АЦП.

У якості пристрою, що забезпечував надання повітря під тиском, був обраний вантажнопоршневий манометр типу МП-60. Він складається із трьох основних вузлів [3]:

- механічного нагнітача повітря, поршень якого переміщується за допомогою обертаючого руків'я, чим і забезпечує тиск у ресивері до 150 МПа;

- ресивера-ємності для стислого повітря;

- зразкового манометру надмірного тиску МДИ 88-150.

Технічні характеристики вантажно-поршневого манометру наведені в таблиці 2.

Як вимірники напруги використовувалися універсальні цифрові вольтметри типу В7-35, призначені для виміру напруги й сили постійного й змінного струмів.

Таблиця 2 – Технічні характеристики вантажно-поршневого манометра МП-60

Характеристики і параметри	Числові значення
Тиск у ресивері, МПа	150
Ємність ресивера, л	5
Діапазон шкали манометра, МПа	0÷150
Ціна ділення, МПа	0,5
Похибка, %	0,5%
Маса, кг	18

В якості підсилювача використовувався підсилювач постійного струму на базі операційного підсилювача, розроблений і виготовлений на кафедрі КРСКД НТУ «ХП».

У якості АЦП застосовувався функціонально закінчений АЦП типу Ф7077/1.

З урахуванням обраної апаратури структурна схема експериментальної установки для

визначення градувальних характеристик датчику тиску в циліндрі ДВЗ мала вид зображений на рис. 5.

Експериментальні дослідження проводилися в наступній послідовності:

а) Визначалися окремо градувальні характеристики первинного вимірювального перетворювача, вмикненого за схемою нерівноважного мосту.

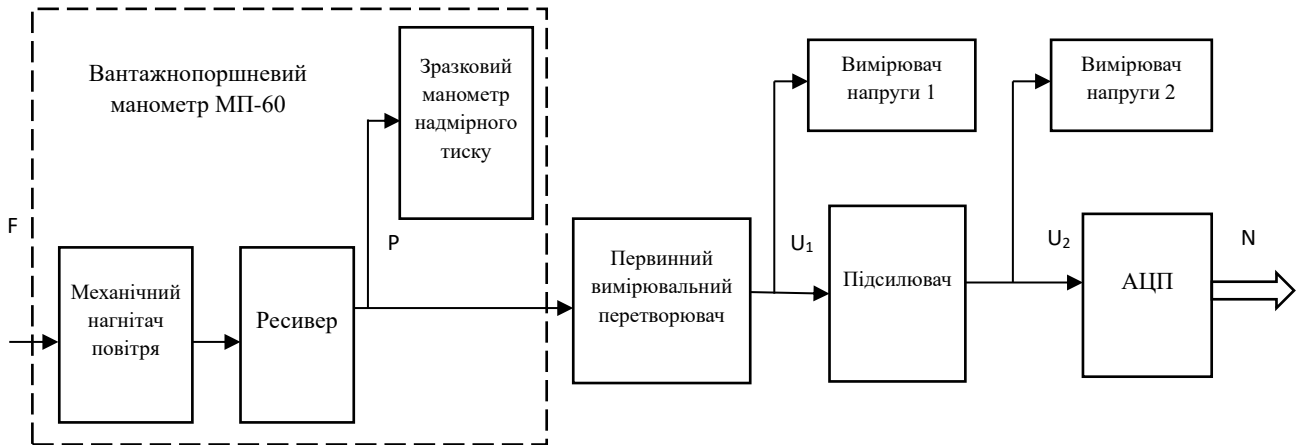


Рис. 5 – Структурна схема експериментальної установки для визначення градувальних характеристик

Вони знімалися при різних струмах живлення мосту. За результатами експериментальних даних був побудований, отриманий ряд градувальних характеристик, одна й з яких показана на рис. 6. З неї

видно, що напруга на виході мосту, досягає 20 мВ при вхідному тиску 15 МПа. Ця характеристика знімалася при струмі живлення мосту рівному 40 мА.

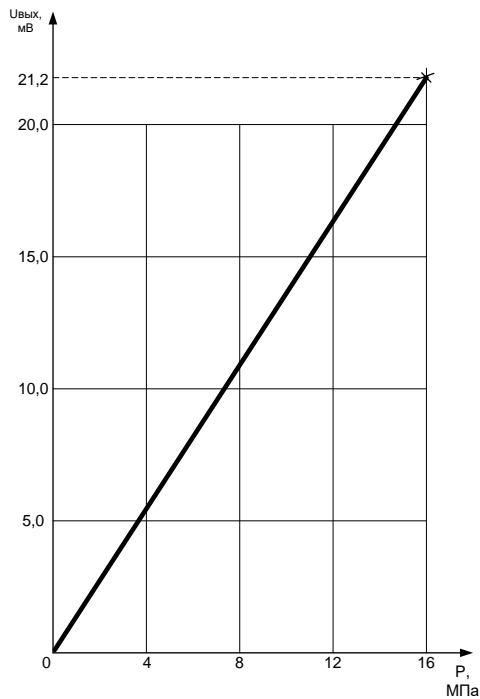


Рис. 6 – Експериментальна градувальна характеристика первинного вимірювального перетворювача при  $I_{ж.м} = 40$  мА

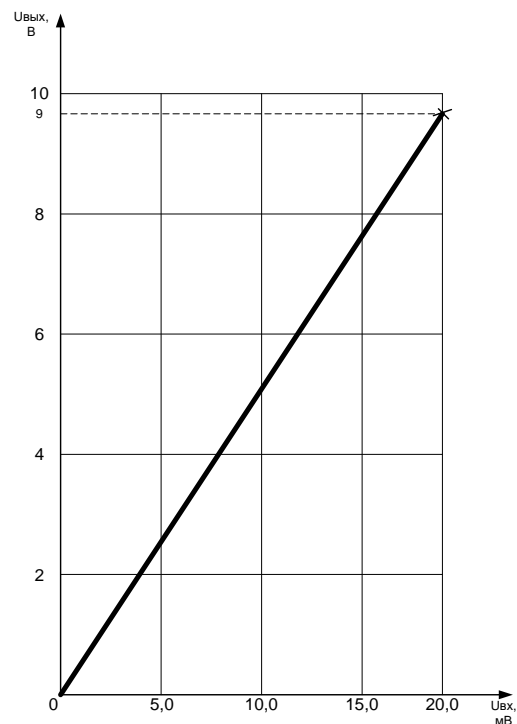


Рис. 7 – Експериментальна градувальна характеристика підсилювача при  $R_{33} = 150$  кОм

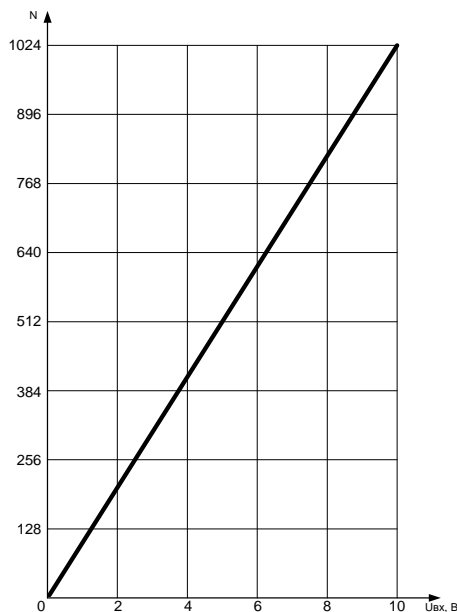


Рис. 8 – Експериментальна градувальна характеристика АЦП

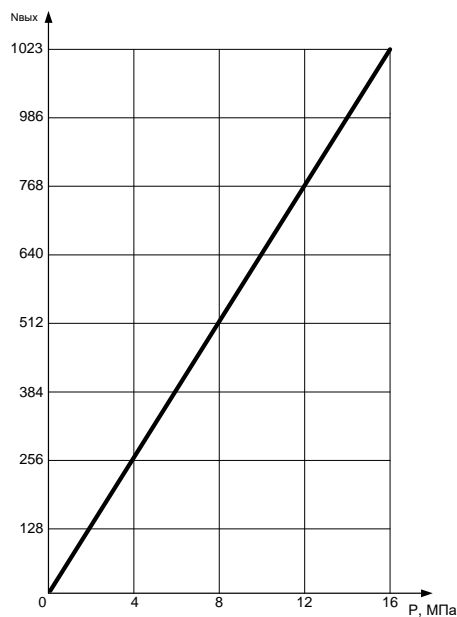


Рис. 9 – Експериментальна градувальна характеристика датчика тиску при  $R_{ж.м.} = 40$  мА та  $R_{зз} = 150$  кОм

б) Визначалися окремо градувальні характеристики підсилювача.

Вони знімалися при різних коефіцієнтах зворотного зв'язку операційного підсилювача. Одна з них при значенні  $R_{зз} = 150$  кОм наведена на рис. 7.

в) Визначалася реальна градувальна характеристика АЦП. Вона наведена на рис. 8.

г) Визначався ряд градувальних характеристик датчика (тобто усього вимірювального каналу). Вони визначалися при різних значеннях струму живлення мосту й коефіцієнтів підсилювання нормуючого підсилювача. На рисунку 9 наведений вид градувальної характеристики, що визнана оптимальною для даного датчика (при струмі живлення мосту 40 мА и опорі зворотного зв'язку підсилювача 150 кОм).

д) Чутливість датчика визначалась розрахунковим шляхом на підставі експериментальних даних градувальної характеристики датчика. При цьому вихідну величину вимірювали в одиницях молодшого розряду (ОМР) АЦП. Чутливість датчика склала  $63,94 \frac{ОМР}{МПа}$ .

### Висновки

1. Розроблена схема експериментальної установки для отримання градувальних характеристик датчика тиску і його окремих перетворювачів та обрані засоби вимірювань для проведення експериментальних досліджень задовольняють особливостями вимірів параметрів ДВЗ при різних видах випробувань, за допомогою комп'ютерних систем контролю та діагностики.

2. Створена установка для проведення експериментальних досліджень має технічні характеристики, які забезпечують виконання всіх вимог в діапазоні зміни вхідних і вихідних сигналів при різних видах випробувань ДВЗ.

3. Експериментально визначені реальні градувальні характеристики первинного вимірювального перетворювача, підсилювача, АЦП і датчика в цілому, підтвердили що його точність задовольняє вимогам ДСТУ, а також спроможність його використання в комп'ютерних системах контролю та діагностики ДВЗ.

### Список літератури

1. Двигатели внутреннего сгорания. Кн.2 / под ред. В.Н. Лукашина //.- М.: Высшая школа, 2007. – 414 с.
2. Макаров Р.А. Средства технической диагностики машин / Р.А.Макаров // М.: Машиностроение, 1989. -213 с.
3. Иванов Б.С. Измерение давлений переходных процессов / Б.С.Иванов, С.П.Харитонов С.П //.- СПб.: – Питер, 2008.– 319 с.
4. Технические средства диагностики: Справочник. / под. ред. В.В. Клюева //.- М.: Машиностроение, 1989. – 672 с.
5. Евтихеев Н.Н. Измерения электрических и неэлектрических величин / Н.Н. Евтихеев, Я.А. Купершmidt, В.Ф. Папуловский, В.Н. Скугоров //.- М.: Энергоатомиздат, 1990. – 352 с.

### References (transliterated)

1. Dvigateli vnutrennego sgoraniya. Kn.2 / pod red. V.N. Lukashina //.- Moscow: Vysshaya shkola, 2007. – 414 p.
2. Makarov R.A. Sredstva tehnicheckoj diagnostiki mashin / R.A.Makarov // Moscow: Mashinostroenie, 1989. -213 p.
3. Ivanov B.S. Izmerenie davlenij perehodnyh processov / B.S.Ivanov, S.P.Haritonov S.P //.- SPb.: – Piter, 2008.– 319 p.
4. Tehniceskie sredstva diagnostiki: Spravochnik. / pod. red. V.V. Klyueva //.- Moscow: Mashinostroenie, 1989. – 672 p.
5. Evtiheev N.N. Izmereniya elektricheskikh i neelektricheskikh velichin / N.N. Evtiheev, Ya.A. Kupersmidt, V.F. Papulovskij, V.N. Skugorov //.- Moscow: Energoatomizdat, 1990. – 352 p.

Надійшла (received) 21.10.2019

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 дівгностики», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна

УДК 621.165

**Р. Б. ШЕРФЕДИНОВ, М. Г. ИЩЕНКО, Л. О. СЛАСТЬОН, С. В. АЛЬОХІНА****ПІДВИЩЕННЯ ЕКОНОМІЧНОСТІ ТА НАДІЙНОСТІ ЦНТ ПОТУЖНИХ ПАРОВИХ ТУРБІН**

Проаналізовані шляхи підвищення економічності та надійності циліндрів низького тиску (ЦНТ) парових турбін. Дані характеристики останніх ступенів ЦНТ з робочими лопатками довжиною 1100 і 1650 мм. Визначені резерви підвищення економічності і надійності ступенів ЦНТ. Зазначені особливості формоутворення останніх ступенів ЦНТ з робочими лопатками довжиною 1100 та 1650 мм і направляючими апаратами з шаблевидними сопловими лопатками. Застосування комбінованої шаблевидності призводить до зменшення масової витрати пари в периферійній області і, за рахунок цього, збільшення масової витрати пари в кореневій області. Отриманий в ступені з меридіональною шаблевидністю викладений вище ефект дозволяє значно зменшити відсмоктування вологоємного пара з периферійної зони міжвінцевого проміжку при забезпеченні ефективного якості активної протиерозійного захисту робочих лопаток останніх ступенів циліндрів низького тиску. Підвищення економічності останньої ступені тільки за рахунок застосування шаблеподібних лопаток становить 1,5–2,5 %. Для передостанньої ступені ефект від застосування шаблеподібних лопаток може скласти до 2 %.

**Ключові слова:** циліндр низького тиску, робоча лопатка, шаблевидність, економічність.

**Р. Б. ШЕРФЕДИНОВ, М. Г. ИЩЕНКО, Л. А. СЛАСТЁН, С. В. АЛЁХИНА****ПОВЫШЕНИЕ ЭКОНОМИЧНОСТИ И НАДЕЖНОСТИ ЦНД МОЩНЫХ ПАРОВЫХ ТУРБИН**

Проанализированы пути повышения экономичности и надежности цилиндров низкого давления (ЦНД) паровых турбин. Даны характеристики последних ступеней ЦНД с рабочими лопатками 1100 и 1650 мм. Определены резервы повышения экономичности и надежности ступеней ЦНД. Обозначены особенности формообразования последних ступеней ЦНД с рабочими лопатками длиной 1100 и 1650 мм и направляющими аппаратами с саблевидными сопловыми лопатками. Применение комбинированной саблевидности приводит к уменьшению массового расхода пара в периферийной области и, за счет этого, увеличение массового расхода пара в корневой области. Полученный в степени с меридиональной саблевидностью изложенный выше эффект позволяет значительно уменьшить отсасывания влажного пара из периферийной зоны межвенцевого промежутке при обеспечении эффективного качества активной противорозийной защиты рабочих лопаток последних ступеней цилиндров низкого давления. Повышение экономичности последней ступени только за счет использования саблевидных лопаток составляет 1,5-2,5 %. Для предпоследней ступени эффект от использования саблевидных лопаток может составить до 2 %.

**Ключевые слова:** цилиндр низкого давления, рабочая лопатка, саблевидность, экономичность.

**R. SHERFEDINOV, M. ISHCENKO, L. SLASTON, S. ALYOKHINA****ENHANCEMENT OF COST-EFFECTIVENESS AND RELIABILITY OF LPCS OF POWERFUL STEAM TURBINES**

The ways of increasing the cost-effectiveness and reliability of low pressure cylinders (LPC) of steam turbines are analyzed. The characteristics of the last stages of the low pressure cylinder with rotor blades 1100 and 1650 mm are given. The reserves of increasing the efficiency and reliability of the low-pressure cylinder stages are determined. Designation features of the last stages of the low pressure cylinder with working blades 1100 and 1650 mm long and guiding devices with saber-shaped nozzle blades are indicated. The use of combined scribbling leads to a decrease in the mass flow of steam in the peripheral region and, due to this, an increase in the mass flow of steam in the root region. Obtained in the degree of meridional saber-like effect described above allows to significantly reduce the suction of moisture-absorbing steam from the peripheral zone of the inter-gap gap while ensuring the effective quality of active anti-erosion protection of the working blades of the last stages of low pressure cylinders. Increasing the cost-effectiveness of the last stage only through the use of saber-shaped blades is 1.5-2.5 %. For the penultimate stage, the effect of the use of saber-shaped blades can be up to 2 %.

**Keywords:** low pressure cylinder, rotor blade, saber-shaped, cost-effectiveness.

**Вступ.** Сучасні задачі створення та модернізації енергетичного обладнання пред'являють високі вимоги до вдосконалення показників економічності та надійності потужних енергетичних парових турбін. Зазначені показники в значній мірі визначаються рівнем газодинамічної досконалості циліндра низького тиску включаючи вхідний патрубок з ресиверами, проточну частину ступенів і вихлопного тракту до конденсатора. В циліндрах низького тиску (ЦНТ), в свою чергу, одне з центральних місць займає вихлопний відсік, що включає останню ступень з попередньо включеном міжступеневим проміжком і вихлопним трактом у складі вихлопного і перехідного патрубків, так як в потужних парових турбінах теплових електростанцій (ТЕС) і особливо атомних електростанцій (АЕС) останні ступені виробляють більшу потужність, а втрати з вихідною швидкістю складають значну величину від наявного перепаду тепла. Тому вдосконалення газодинамічних і енергетичних характеристик вихлопного відсіку може забезпечити надійність і помітне підвищення коефіцієнта корисної дії (ККД) турбоагрегату.

Оскільки вихлопний відсік складається з останнього ступеня і вихлопного тракту, то, звичайно, його ефективність визначається як ступенем так і трактом в умовах взаємовпливу. Останнє проявляється у впливі нерівномірності гідравлічного опору вихлопного тракту в окружному і радіальному напрямках, турбулентності за ступенем, витоку пари через канали видалення вологи і надбандажний проміжок та ін. В той же час надійність вихлопного відсіку в основному визначається надійністю робочого колеса ступеня за параметрами міцності і ерозійної стійкості.

Досвід експлуатації потужних парових турбін АТ «Турбоатом» свідчить про високу надійність останніх ступенів і всього облопачування ЦНТ з різною частотою обертання. В той же час досягнуті в минулі роки успіхи в розробці та апробації нових технічних рішень, спрямованих на отримання більш високих експлуатаційних і техніко-економічних показників турбін, показують, що наявні проточні частини розполагають резервами по економічності. Реалізація

© Р. Б. Шерфедінов, М. Г. Іщенко, Л. О. Сластион, С. В. Альохіна, 2019

цих резервів, навіть дискретно, дозволяє досягати сучасного технічно можливого рівня. Тому створення нових циліндрів низького тиску та модернізація існуючих виконується комплексом розрахунково-конструкторських розробок на базі найбільш ефективних та апробованих рішень в турбінобудуванні з використанням чисельного 3D-експерименту, що дозволяє приймати більш ефективні та надійні рішення.

**Характеристика останніх ступенів ЦНТ** з робочими лопатками довжиною 1100 і 1650 мм. Останні ступені з робочими лопатками довжиною 1100 мм і 1650 мм працюють на вологій парі, що надходить із передостаннього ступеня через канал міжступеневого проміжку з відбором пари. Меридіональний обвід цього каналу утворений у відсіку з лопаткою 1100 мм – спеціальним профільованим кільцем, що є елементом обода діафрагми передостаннього ступеня, в відсіку з лопаткою 1650мм – спеціальним профільованим кільцем, прикріпленим до обода діафрагми передостанньої ступені через дистанційні втулки для утворення кільцевої щілини відсмоктування вологоємного пара. Між зазначеними кільцями і обіддям діафрагм останніх ступенів утворені кільцеві щілини відбору пари в систему регенерації.

Розглянуті останні ступені мають розвинену систему вологовидалення, що включає сепарацію всередині каналу і відсмоктування вологоємного пара з периферійної зони міжвінцевого проміжку. Всередині каналу сепарація здійснюється відсмоктуванням плівкової вологи через одну щілину на спинці соплової лопатки.

В ступенях з лопатками довжиною 1100 мм і 1650мм відсмоктування плівкової вологи і вологоємної пари з міжвінцевого проміжку здійснюється через дві кільцеві щілини (за вихідними кромками соплових лопаток і перед вхідними кромками робочих лопаток), утворені спеціальним кільцем між ободом діафрагми і надбандажним кільцем ущільнювача, а також через надбандажний канал. Зазначене кільце утворює меридіональний периферійний обвід міжвінцевого проміжку ступеня.

Основні геометричні параметри останніх ступенів ЦНТ виробництва АТ «Турбоатом» приведені в [1, 2] з робочою лопаткою 1100 мм – в [3], з 1650 мм – в [4].

Додатково наведемо деякі геометричні параметри, що характеризують особливості формоутворення проточної частини вище зазначених останніх ступенів з урахуванням передостанніх ступенів, так як передостанній ступінь і міжступеневий канал формують параметри потоку перед останнім ступенем.

Повна геометрична периферійна перекириша По, яка дорівнює різниці периферійних радіусів робочих решіток останньої і передостанньої ступенів, становить в ступені з лопаткою 1100мм – 48,3 %, осьова відстань між вихідною кромкою робочих

лопаток передостаннього ступеня і вхідними кромками робочих лопаток останнього ступеня в периферійних перерізах  $Loz = 55,6 \%$ . В результаті кут меридіонального розкриття умовного обводу ступені становить  $\alpha_0 = 41$  град. Перекириші міжступеневі і міжвінцеві становлять:  $P_{мс} = 18,1 \%$  і  $P_{мв} = 4,2 \%$ , відповідно. При цьому частка міжвінцевої перекириші  $P_{мв} / Po$  становить 8,7 %. Геометричний кут меридіонального периферійного розкриття в міжвінцевому проміжку  $\alpha_{мв} = \arctg (P_{мв} / L_{мвz}) = 22,1$  град.

У ступені з лопаткою 1650мм По становить 42,7 %,  $Loz = 46,9 \%$ ,  $\alpha_0 = 42,4$  град.,  $P_{мс} = 18,5 \%$ ,  $P_{мв} = 6,6 \%$ ,  $P_{мв} / Po = 15,5 \%$ .  $\alpha_{мв} = \arctg (P_{мв} / L_{мвz}) = 40,8$  град.

**Резерви підвищення економічності і надійності ступенів ЦНТ потужних парових турбін.** На загальну думку, в ЦНТ зосереджені не тільки найскладніші проблеми аеродинаміки турбіни, а й містяться найбільші резерви підвищення економічності. В першу чергу це відноситься до останніх ступенів з вихлопними трактами, але це стосується також передостанніх ступенів та інших.

Економічність ступеня значною мірою залежить від умов входу в ступінь і робоче колесо. Одними з таких параметрів, які формують ці умови, є міжступеневі і міжвінцеві перекириші, осьові міжступеневі і міжвінцеві проміжки на периферії. Якщо значення перекириш віднести до довжини робочих лопаток, то загальна, міжступенева і міжвінцева складають в ступені з лопаткою 1100 мм: 48,3; 18,1; 4,2 %; в ступені з лопаткою 1650мм: 42,7; 18,5; 6,6 %. Ці значення не враховують відбір пари з міжступеневого проміжку і витoku пари з міжвінцевого проміжку, але якісно дозволяють відзначити, що ці показники в ступенях з лопатками 1100 мм і 1650 мм гірші, ніж в інших останніх ступенях вже існуючих турбін.

В якості додаткової інформації для подальшого аналізу наведені також значення умовних кутів периферійного розкриття в міжвінцевих проміжках передостанніх ступенів в проточних частинах з робочими лопатками 1100 мм і 1650 мм: 40,2 і 40 град. відповідно.

Відносно вказаних кутів в міжвінцевих проміжках потрібно підкреслити, що фактична їх величина при обліку витоків пари з міжвінцевого проміжку, які створюють газодинамічну перекиришу, буде значно більше.

Значення наведених параметрів однозначно показують, що в периферійній зоні міжвінцевих проміжків останніх і передостанніх ступенів має місце вихрова течія з підвищеними втратами, що знижують ККД ступені [5], а також додатково генеруючими великодисперсну вологу, що підвищує ерозійні навантаження на робочі лопатки. Ефект підвищення ерозійного навантаження підтверджений досвідом експлуатації ступенів з робочими лопатками 1030мм, що мають в міжвінцевому проміжку відносну



міжвінцеву перекришу рівну 7,2% і кут меридіонального розкриття 54 град. Таким чином, міжвінцева перекриша, як параметр, однозначно не може визначати якість проточної частини ступеня. А також впливає висновок про те, що формування ступенів за критерієм виведення лінії периферійного обводу соплового апарату в вихідну кромку під бандажем робочої лопатки не забезпечує очікуваний ефективний результат. Можливо деякі параметри при розробці ступенів ЦНТ формувалися з використанням принципового положення, наведеного в [6]: «Збільшена перекриша між направляючою і робочою лопатками у периферійному обводі, оптимальне значення якої за експериментальними дослідженнями ХПП – АТ «Турбоатом» досягало для випробуваних ступенів 0,15-0,18 довжини робочої лопатки».

Існуюча в енергетичному турбобудуванні тенденція до збільшення розмірів останніх ступенів призводить до зростання периферійної окружної швидкості робочих лопаток, яка в даний час досягає 650 м / с і більше. У розглянутих в даній роботі ступенях робочі лопатки довжиною 1100 мм і 1650 мм мають периферійні окружні швидкості рівні 644 і 487 м/с. Зі збільшенням окружних швидкостей зростають втрати від вологості і посилюється ерозійний вплив вологи на робочі лопатки. Тому дуже важливе значення має ефективна організація течії вологої пари в проточній частині та вологовидалення. Зменшення кількості ерозійно небезпечної вологи, що досягає робочих лопаток розглянутих останніх ступенів, досягається організацією відбору пари перед ступенем з міжступінчатим проміжком, відсмоктування плівковою вологою зі спинки соплових лопаток в системі середньоканальної сепарації і відбору вологоємної пари з периферійної зони міжвінцевого проміжку через канали вологовидалення.

Система середньоканальної сепарації з одною щілиною на спинці направляючих лопаток (НЛ) була розроблена і експериментально досліджена в шістдесяті роки. Накопичені до теперішнього часу дані показують, що найбільш ефективним є виконання по обводу профілю в периферійній зоні щілини на зовнішній (ближче до входу) і на внутрішній стороні профілю (ближче до горла каналу), де тиск приблизно однаковий [7].

Відбір вологоємного пара з міжвінцевого проміжку зменшує витрату пари через робочу решітку, зменшує тиск в міжвінцевому проміжку, зменшує реактивність, збільшує газодинамічну перекришу, що значно змінює структуру течії і збільшує втрати, тобто, чим більше додаткові втрати будуть перевищувати зниження втрат від впливу вологи, тим більше енергії буде витрачено на підвищення ерозійної стійкості робочих лопаток.

Одним з параметрів, що впливають на ерозійну стійкість робочих лопаток, є осьова довжина міжвінцевого проміжку. Збільшення міжвінцевого проміжку знижує вплив змінних аеродинамічних сил і інтенсивність ерозійного впливу на робочі лопатки за

рахунок розгону і дроблення великодисперсної вологи, але може збільшувати втрати енергії. Якщо, наприклад, скористатися залежністю для оцінки критеріального коефіцієнта ерозійної стійкості фірми «Крафт верк Уніон» (КВУ), що має вигляд:  $E = (y_{02} / P_0) \cdot U_{п3} \cdot K_r$ , де експериментальний коефіцієнт  $K_r$ , що є функцією довжини міжвінцевого проміжку і товщини вихідної кромки соплової лопатки, при збільшенні проміжку в 2,3 рази, збільшується в 2,3 рази [8]. За результатами численних досліджень ППМаш, проведеним за даними чисельного експерименту вихлопного відсіку [1], збільшення проміжку в 2 рази збільшило відносну ерозійну стійкість Est в 2,6 рази [9].

Таким чином, оптимізація системи внутриканальної сепарації або заміна її на систему обігріву направляючих лопаток за умови її економічної доцільності, вибір ефективної величини відбору вологоємного пара з периферійної зони міжвінцевого проміжку і осьової довжини цього проміжку є важливим завданням при створенні останніх ступенів ЦНТ.

Соплові лопатки зазвичай виконуються прямими, встановленими практично радіально, що спрощує технологію виготовлення. Однак ступені з такими направляючими апаратами мають підвищені значення кінцевих і вихідних втрат, обмежують величину кореневої реактивності.

Одним з ефективних методів поліпшення аеродинамічних характеристик ступенів в останні роки є застосування шаблеподібних соплових лопаток в направляючих апаратах. В результаті просторового профілювання направляючого апарату кореневі перерізи соплових шаблеподібних лопаток нахиляють в окружному (тангенціальному) напрямку в бік обертання робочого колеса, а периферійні назустріч потоку в меридіональній площині.

Вперше тангенціальна шаблевидність запропонована в 1962 році в СРСР [10], а перші потужні парові турбіни з шаблевидним направляючим апаратом випущені фірмою «Siemens» в середині 1980-х років. Зараз багато провідних виробників турбін (Siemens, Alstom, Skoda, Ansaldo, Mitsubishi, «Силові Машини» і ін.) Застосовують направляючі апарати останнього ступеня ЦНТ зі складною комбінованою меридіональною і тангенціальною шаблевидністю [11, 12].

В останніх ступенях з модифікованим сопловим апаратом знижуються кореневі і периферійні кінцеві втрати. Виграш виникає від того, що зменшується частка пара, що протікає через кореневу і периферійну зону ступені. При цьому помітно підвищується коренева реактивність, що розширює область стабільної роботи ступені при часткових режимах, знижується градієнт ступеня реактивності по висоті направляючого апарату, знижується рівень втрат кінетичної енергії, а також зменшуються вихідні втрати. До цього можна додати, що локальне зниження наведеного масової витрати в периферійній області призводить до зменшення кількості ерозійно

небезпечної вологи, а збільшення проміжку між робочим колесом і направляючим апаратом сприяє більшому розгону крапель вологи, що утворюється. Збільшення швидкості крапель вологи наближає їх траєкторію руху до напрямку руху пара, зменшуючи тим самим силу удару крапель про вхідну кромку. Це додатково дозволяє значно підвищити ефективність протиерозійного захисту робочих лопаток при значному зменшенні витрати пари в систему вологовидалення [12, 13, 14].

Потік пари в останньому ступені в ЦНТ має просторовий характер. Тому для отримання достовірного результату треба використовувати чисельні 3D експериментальні дослідження. Як експериментальні, так і чисельні дослідження показали, що вони визначають кінцеві результати, і особливо при широкому діапазоні зміни режимів, необхідно проводити на рівні чисельного експерименту не для ізольованих ступенів, а для вихлопного відсіку, тобто спільно з вихлопних трактом в умовах взаємовпливу. З цього випливає, що реальну ефективність оптимізації останнього ступеня коректно можна оцінити тільки з урахуванням впливу вихлопного тракту.

Зміну останнього ступеня із застосуванням направляючих апаратів з комбінованою шаблевидністю доцільно застосувати для передостаннього ступеня, а також для інших ступенів ЦНТ.

За різними оцінками підвищення економічності останнього ступеня тільки за рахунок застосування шаблеподібних лопаток становить 1,5–2,5 %. Цей ефект значно збільшується за рахунок зменшення в 4–6 разів витрати пари в систему вологовидалення. Для передостаннього ступеня ефект від застосування шаблеподібних лопаток може скласти до 2 %.

Особливості формоутворення останніх ступенів ЦНТ з робочими лопатками довжиною 1100 та 1650 мм і направляючими апаратами з шаблевидними сопловими лопатками. Створення останнього ступеня з використанням шаблеподібних соплових лопаток в є багатопараметричною задачею. Відповідно, слід дотримуватися варіантних розрахунково-конструкторських розробок з урахуванням технологічних обмежень і проведення чисельних 3D експериментів. Тому в обсязі даної роботи виконана тільки концептуальна розрахунково-конструктивна оцінка, що показує практичну можливість і особливості формоутворення останнього ступеня ЦНТ з робочими лопатками довжиною 1100 мм і 1650 мм при застосуванні шаблевидних соплових лопаток.

Меридіональна периферійна шаблевидність. Формування меридіональної шаблевидності в ступені виконано шляхом коригування вихідної кромки соплової лопатки тільки в периферійній зоні в результаті завдання існуючої довжини соплової лопатки і стартового значення кута шаблевидності. Відсмоктування плівкової вологи і вологоємного пара

з міжвінцевого проміжку здійснюється через дві кільцеві щілини (за вихідними кромками соплових лопаток і перед вхідними кромками робочих лопаток), утворені спеціальним кільцем між ободом діафрагми і надбандажним кільцем ущільнювача, а також через надбандажний канал. Зазначене кільце утворює меридіональний периферійний обвід міжвінцевого проміжку ступеня.

Формування меридіональної шаблевидності в ступені з робочою лопаткою 1100 мм приведено на рис. 1а., в ступені з робочою лопаткою 1650 мм приведено на рис. 1б.

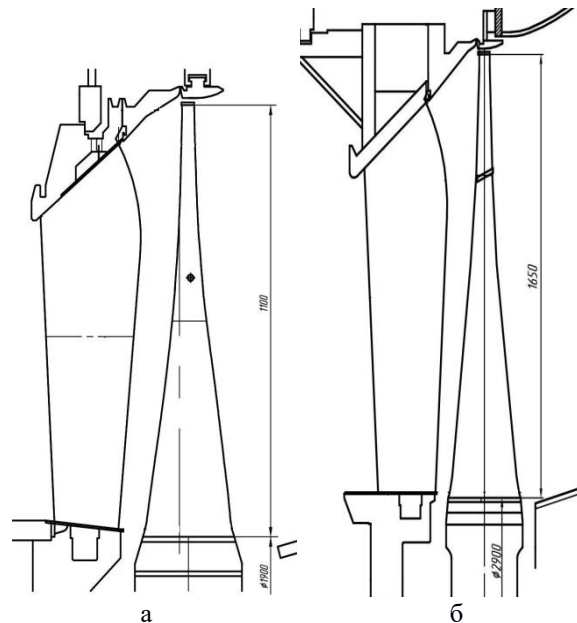


Рис. 1 – Формування меридіональної шаблевидності: а – ступінь с робочою лопаткою 1100 мм; б – ступінь з робочою лопаткою 1650 мм

**Коренева окружна шаблевидність.** Формування направляючого апарату з кореневої окружною шаблевидністю і меридіональною шаблевидністю вимагає проведення оптимізації соплових каналів з урахуванням формування нових ліній течії парового потоку. На рис. 2 наведено варіанти направляючих апаратів ступенів з зменшеною кількістю соплових лопаток. Особливістю виконаної окружної шаблевидності є утворення в периферійній області невеликої шаблевидності проти потоку.

Висновки. У ЦНТ зосереджені не тільки найскладніші проблеми аеродинаміки турбіни, а й містяться найбільші резерви підвищення економічності. В першу чергу, це відноситься до останніх ступенів з вихлопними трактами, а також передостанніми ступенями.

Одним з ефективних методів поліпшення аеродинамічних характеристик ступенів в останні роки є застосування шаблеподібних соплових лопаток в направляючих апаратах.

Застосування комбінованої шаблевидності призводить до зменшення масової витрати пари в периферійній області і, за рахунок цього, збільшення

масової витрати пари в кореневій області. Витрата пари в середньому перерізі залишається на колишньому рівні. В результаті знижується градієнт ступеня реактивності по висоті направляючого апарату, збільшується степінь реактивності в кореневій зоні направляючого апарату, що розширює область стабільної роботи ступеня при часткових навантаженнях.

Меридіональна шаблевидність в ступенях з великим кутом меридіонального розкриття проточної частини на периферії забезпечує локальне піджимання потоку пари до периферійного обводу проточної частини, зниження інтенсивності вторинних течій в периферійній області і зменшення втрати кінетичної енергії.

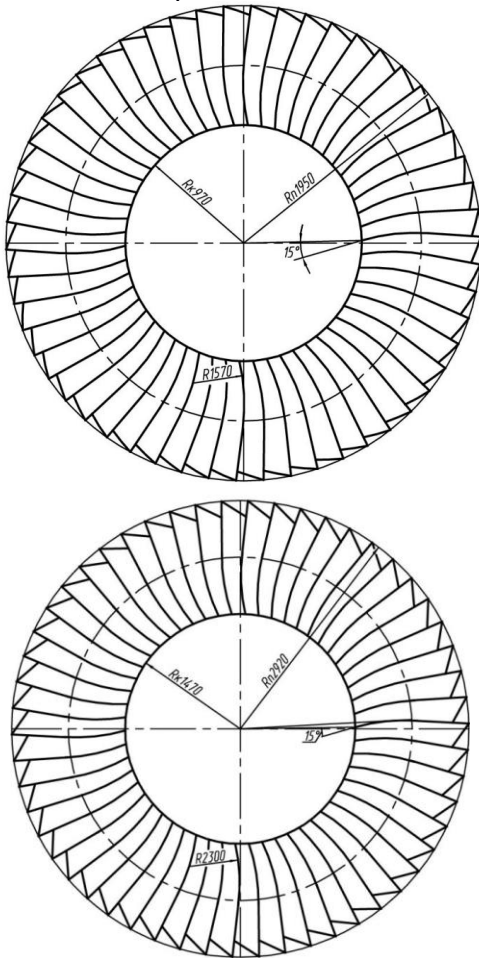


Рис. 2 – Направляючі апарати ступенів з шаблевидністю

У ступені з меридіональною шаблевидністю соплових лопаток в результаті зниження масової витрати пари в периферійній області зменшується кількість великодисперсної ерозійно небезпечної вологи, що потрапляє в незалежно сформований збільшений міжвінцевий проміжок між вихідними кромками соплових лопаток і вхідними кромками робочих лопаток. Збільшення міжвінцевого проміжку сприяє більшому розгону і зменшенню дисперсності крапель вологи, що утворюється. Збільшення швидкості крапель вологи наближає їх траєкторію руху до напрямку руху пари, зменшуючи тим самим силу удару крапель об вхідні кромки робочих лопаток,

знижуючи їх ерозійні навантаження і потужність гальмування робочого колеса.

Отриманий в ступені з меридіональною шаблевидністю викладений вище ефект дозволяє значно зменшити відсмоктування вологоємного пара з периферійної зони міжвінцевого проміжку при забезпеченні ефективного якості активної протиерозійного захисту робочих лопаток останніх ступенів циліндрів низького тиску.

Розробка нових і модернізованих ступенів ЦНТ із застосуванням направляючих апаратів з комбінованою шаблевидністю лопаток повинна виконуватися в єднанні розрахунково-конструкторських робіт з проведенням чисельних 3D експериментів для досягнення найбільш ефективних результатів з формування проточної частини ступенів в складі відсіків і всього ЦНТ.

У останньому ступені з шаблевидними сопловими лопатками змінюються значення і розподіл параметрів за робочим колесом, а також вихідна втрата. При цьому відповідно змінюються газодинамічні і енергетичні характеристики вихлопного тракту. Тому розрахунки, виконані без урахування впливу вихлопного тракту, не дозволяють коректно оптимізувати останню ступінь. Таким чином, реальні характеристики ступені і вихлопного тракту необхідно визначати в процесі проведення чисельних 3D експериментальних досліджень останньої ступені спільно з вихлопним трактом.

Підвищення економічності останньої ступені тільки за рахунок застосування шаблеподібних лопаток становить 1,5–2,5 %. Для передостанньої ступені ефект від застосування шаблеподібних лопаток може скласти до 2 %.

#### Список літератури

1. Солодов В. Г. Розрахункові дослідження з визначення й удосконалення газодинамічних і енергетичних характеристик вихлопного відсіку ЦНТ з робочою лопаткою останніх ступенів довжиною 1100 мм. Звіт (промеж.1). х / д. № 33-06-12. ХНАДУ. 2012. – С. 108.
2. Конев В. А. Останні рівні ЦНД з робочою лопаткою 1030 мм. Деякі питання ерозійної надійності і економічності. Звіт. Д-6736. ВАТ «Турбоатом». 2009. С. 33.
3. Солодов В. Г. Дослідження особливо формоутворення Вихлопна відсіків перспективних ЦНТ турбін на 3000 об / хв з підвальною Розташування конденсатора та їх Вдосконалення. Звіт. х / д. № 33-06-13. ХНАДУ. 2013. С. 76.
4. Солодов В. Г. Дослідження і удосконалення газодинамічних і енергетичних характеристик проточної частини ЦНТ з Робочий лопаткою довжина 1650 мм. Звіт. х / д. № 33-06-15. ХНАДУ. 2015. – С. 86.
5. Марченко Ю. О. Розробка пропозицій щодо оптимізації проточної частини ЦНД з лопаткою 936мм. Звіт. х / д. № 476-92. НВО ЦКТІ.1992. С.17.
6. Левченко Є.В., Сухинин В.П., Аркадьев Б.А., Москвіна Л.Д., Свеченовський Ю.К. Розробка останніх ступенів парових турбін НВО «Турбоатом» // Теплоенергетика. 1994. №4. С. 7-11.
7. Трояновський Б.М. Удосконалення проточних частин парових турбін // Теплоенергетика.1996. №1. С.10-17.
8. Трояновський Б.М. Турбіни для атомних станцій. Изд.2. – Москва. Вища школа. 1986.
9. Ковальський А.Д., Швецов В.Л., Конев В.А. Чисельні дослідження ерозійної стійкості робочих лопаток останніх ступенів потужних парових турбін при зміні їх параметрів // Проблеми машиностроєння.-2010.-том 13, №4.-С.3–9.

10. Дейч М.С., Губарев А.В., Філіппов Г.А., Ван Чжун-Ци. Новый метод профилирования направляющих решеток ступеней с малыми  $d/l$  // Теплоэнергетика. 1962. № 8. – С. 42–47.
11. Трояновский Б.М. Шляхи підвищення економічності парових турбін. Ч.1 // Теплоенергетика.1993. №5. – С.39-46.
12. Тростяков А.М., Ласкін А.С., Захаров А.В. Втрати кінетичної енергії потоку по висоті направляючого апарату останнього ступеня потужних парових турбін // Наука і освіта. №06. Червень 2014. – С. 66–81.
13. Русанов А.В., Пашенко Н.В. Вплив просторового профілювання напрямних лопаток останнього ступеня парової турбіни на аеродинамічні характеристики проточної частини // Проблеми машиностроення.-2010.-том 13, №4. – С. 21–25.
14. Борисов Ф.П., Веревський В.І., Іванов М.Я., Трояновський Б.М., Карелін А.М., Цястон А.П. Просторове профілювання соплової решітки останнього ступеня потужної парової турбіни // Теплоенергетика. 1991. №8. – С. 51–54.
5. Marchenko Yu. O. Rozrobka propozicij shodo optimizaciji protochnoyi chastini CND z lopatkoju 936mm. Zvit. h / d. No 476-92. NVO CKTI.1992. P.17.
6. Levchenko Ye.V., Suhinin V.P., Arkadyev B.A., Moskvina L.D., Svechenovskij Yu.K. Rozrobka ostannih stupeniv parovih turbin NVO «Turboatom» // Teploenergetika. 1994. No4. P. 7-11.
7. Trojanovskij B.M. Udoskonalennya protochnih chastin parovih turbin // Teploenergetika.1996. No1. P.10-17.
8. Troyanovskij B.M. Turbini dlya atomnih stancij. Izd.2. Moskva. Visha shkola. 1986.
9. Kovalskij A.D., Shvecov V.L., Konyev V.A. Chiselni doslidzhennya eroziynoyi stijkosti robochih lopatok ostannih stupeniv potuzhnih parovih turbin pri zmini yih parametriv // Problemi mashinostroeniya.-2010.-tom 13, No4.-P.3–9.
10. Dejch M.Ye., Gubaryev A.V., Filippov G.A., Van Chzhun-Ci. Novij metod profilyuvannya napryamnih reshitok stupeniv z malimi  $d/l$  // Теплоенергетика. 1962. No 8. P. 42–47.
11. Troyanovskij B.M. Shlyahi pidvishennya ekonomichnosti parovih turbin. Ch.1 // Teploenergetika.1993. No5. S.39-46.
12. Tyuhtyaev A.M., Laskin A.S., Zaharov A.V. Vtrati kinetichnoyi energii potoku po visoti napravlyayuchogo aparatu ostannogo stupenya potuzhnih parovih turbin // Nauka i osvita. No06. Cherven 2014. P. 66–81.
13. Rusanov A.V., Pashenko N.V. Vpliv prostorovogo profilyuvannya napryamnih lopatok ostannogo stupenya parovoyi turbini na aerodinamichni harakteristiki protochnoyi chastini // Problemi mashinostroeniya. - 2010.-tom 13, No4.-P.21–25.
14. Borisov F.P., Verevskij V.I., Ivanov M.Ya., Troyanovskij B.M., Karelin A.M., Cyaston A.P. Prostorove profilyuvannya soplovoyi reshitki ostannogo stupenya potuzhnoyi parovoyi turbini // Teploenergetika. 1991. No8. P. 51–54.

#### References (transliterated)

1. Solodov V. G. Rozrahunkovi doslidzhennya z viznachennya j udoskonalennya gazodinamichnih i energetichnih harakteristik vihlopnogo vidsiku CNT z robochoju lopatkoju ostannih stupeniv dovzhinoju 1100 mm. Zvit (promezh.1). h / d. No 33-06-12. HNADU. 2012. P. 108.
2. Konyev V. A. Ostanni rivni CND z robochoju lopatkoju 1030mm. Deyaki pitannya eroziynoyi nadijnosti i ekonomichnosti. Zvit. D-6736. VAT «Turboatom». 2009. P. 33.
3. Solodov V. G. Doslidzhennya osoblivo formoutvorennya vihlopna vidsikov perspektivnih CNT turbin na 3000 ob / hv z pidvalnim Roztashuvannya kondensatora ta yih Vdoskonalennya. Zvit. h / d. No 33-06-13. HNADU. 2013. P. 76.
4. Solodov V. G. Doslidzhennya i udoskonalennya gazodinamichnih i energetichnih harakteristik protochnoyi chastini CNT z RObochij lopatkoju dovzhina 1650mm. Zvit. h / d. No 33-06-15. HNADU. 2015. P. 86.

Надійшла (received) 09.12.2019

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

**Шерфедінов Різа Бахтіярович (Шерфединов Риза Бахтиярович, Sherfedinov Riza)** – заступник начальника конструкторського відділу АТ «Турбоатом», Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5947-7802>

**Ищенко Михайло Григорович (Ищенко Михаил Григорьевич, Ishchenko Mykhailo)** – начальник технологічного відділу АТ «Турбоатом», Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2251-5104>

**Сластьон Любов Олександрівна (Сластён Любовь Александровна, Slaston Liubov)** – начальниця лабораторії жароміцних матеріалів центральної заводської лабораторії АТ «Турбоатом», Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9268-8134>

**Альохіна Світлана Вікторівна (Алёхина Светлана Викторовна, Alyokhina Svitlana)** – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, старший науковий співробітник Інституту проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України, Харків, Україна; [alyokhina@ipmach.kharkov.ua](mailto:alyokhina@ipmach.kharkov.ua), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2967-0150>

УДК. 621. 771. 014

*М. Н. ШТОДА***ВЛИЯНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ НА КОЭФФИЦИЕНТ УШИРЕНИЯ ПРИ ПРОКАТКЕ КРУГЛЫХ ПОЛОС В ОВАЛЬНОМ КАЛИБРЕ С ЗАДНИМ НАТЯЖЕНИЕМ**

В статье приведены лабораторные исследования с использованием круглых алюминиевых и свинцовых полос. Диаметр заготовок составлял 6,5 мм, а диаметр валков стана – 210 мм. Прокатка осуществлялась в овальном калибре шириной 8,8 мм. Во время прокатки создавалось заднее натяжение различной величины. Для создания разных режимов трения в очаге деформации заготовки прокатывались с сухой поверхностью, а также с покрытием мылом или мелом. Экспериментальные данные обрабатывались методами статистического анализа. Результаты исследований показывают, что условия трения в очаге деформации при прокатке круглых полос в овалных калибрах независимо от режима натяжения и прокатываемого материала существенно влияют на величину поперечной деформации металла. Во всех исследуемых случаях, снижение коэффициента трения вызывает снижение уширения, а повышение коэффициента трения – увеличивает поперечное течение металла в очаге деформации. Прокатка свинцовых и алюминиевых круглых полос, покрытых мылом, в овальном калибре протекала с однозонным очагом деформации, то есть при отрицательных значениях опережения. При этом известные формулы для расчета абсолютного уширения не работают, так как все они выведены для условия наличия зоны опережения. Предлагаемая модель учитывает возможность прокатки в овальном калибре с однозонным очагом деформации. Расчетные значения коэффициента уширения при значениях коэффициента трения  $f = 0,05-0,45$  близки к экспериментальным данным. Разработана новая математическая модель для определения коэффициента уширения при прокатке круглых полос в овалных калибрах. Методика расчета коэффициента уширения может быть использована для расчета деформации металла при производстве ватанки в высокоскоростных блоках современных прокатных станов.

**Ключевые слова:** круглая полоса, овалный калибр, заднее натяжение, непрерывная прокатка, трение в очаге деформации.

*М. М. ШТОДА***ВПЛИВ КОЕФІЦІЕНТА ТЕРТЯ НА КОЕФІЦІЕНТ РОЗШИРЕННЯ ПРИ ПРОКАТЦІ КРУГЛИХ РОЗКАТІВ В ОВАЛЬНОМУ КАЛІБРІ З ЗАДНІМ НАТЯГОМ**

У статті наведені лабораторні дослідження з використанням круглих алюмінієвих і свинцевих заготовок. Діаметр заготовок становив 6,5 мм, а діаметр валків стану – 210 мм. Прокатка здійснювалася в овальному калібрі шириною 8,8 мм. Під час прокатки створювався задній натяг різної величини. Для створення різних режимів тертя в осередку деформації заготовки прокатувалися із сухою поверхнею, а також із покриттям милом або крейдою. Експериментальні дані оброблялися методами статистичного аналізу. Результати досліджень показують, що умови тертя в осередку деформації при прокатці круглих заготовок в овалних калібрах незалежно від режиму натягу та матеріалу, який прокатується, істотно впливають на величину поперечної деформації металу. У всіх досліджуваних випадках, зниження коефіцієнта тертя викликає зниження розширення, а підвищення коефіцієнта тертя – збільшує поперечну течію металу в осередку деформації. Прокатка свинцевих і алюмінієвих круглих заготовок, покритих милом, в овальному калібрі протікала з однозонним осередком деформації, тобто при негативних значеннях випередження. При цьому відомі формули для розрахунку абсолютного розширення не працюють, тому що всі вони виведені для умови наявності зони випередження. Пропонована модель враховує можливість прокатки в овальному калібрі з однозонним осередком деформації. Розрахункові значення коефіцієнта розширення при значеннях коефіцієнта тертя  $f = 0,05-0,45$  близькі до експериментальних даних. Розроблено нову математичну модель для визначення коефіцієнта розширення при прокатці круглих заготовок в овалних калібрах. Методика розрахунку коефіцієнта розширення може бути використана для розрахунку деформації металу при виробництві катанки в високошвидкісних блоках сучасних прокатних станів.

**Ключові слова:** кругла заготовка, овалний калібр, задній натяг, неперервна прокатка, тертя в осередку деформації.

*М. N. SHTOIDA***INFLUENCE OF FRICTION COEFFICIENT ON BROADENING COEFFICIENT DURING ROUND STRIPS ROLLING WITH BACK TENSION IN AN OVAL CALIBER**

This article describes laboratory studies performed using round aluminum and lead bars. The diameter of bars was 6.5 mm and diameter of rolls was 210 mm. The rolling was made in an oval caliber 8.8 mm wide. During rolling, back tension of various sizes was created. To create different friction modes in the deformation zone, billets were rolled with a dry surface, as well as coated with soap or chalk. Experimental data was processing by statistical analysis methods. Research results show that the friction conditions in deformation zone during rolling round bars in oval calibers affect significantly on value of the transversal deformation of metal, it is regardless of the tension mode and rolled material. In all studied cases, a decrease in the friction coefficient is causes a decrease in broadening, and an increase in friction coefficient increases the transversal flow of the metal in deformation zone. The rolling of lead and aluminum round bars coated with soap in an oval caliber proceeded with a single-area de-formation zone, i.e., at negative values out-running. Moreover, the well-known formulas for calculating the absolute broadening do not work, since all of them are derived for condition when presence of outrunning area. The proposed model takes into account the possibility of rolling in an oval caliber with a single-area deformation zone. The calculated values of broadening coefficient at the values of friction coefficient  $f = 0.05-0.45$  are close to experimental data. New mathematical model has been developed to determine the coefficient of broadening when rolling round bars in oval calibers. The methodology of calculate the coefficient broadening can be used to calculate metal deformation in the production of wire rod in the high-speed blocks of modern rolling mills.

**Keywords:** round bar, oval caliber, back tension, continuous rolling, friction in deformation zone.

**Введение.** Трение является одним из наиболее значительных физических явлений, влияющих на формирование металла при прокатке. Как отмечено в работе [1, с. 9], «на действии сил трения основано само существование процесса прокатки», однако существует различные точки зрения на природу трения при прокатке. Поэтому при решении задач прокатного производства залогом успеха является правильный выбор модели контактных условий

рабочего инструмента с обрабатываемым материалом. Тем не менее, «единство мнений по вопросам контактного взаимодействия не достигнуто, более того, обсуждение порой носит острый дискуссионный характер» [2, с. 57].

**Анализ состояния вопроса.** Исследования в работе [3] показали, что увеличение трения при

© М. Н. Штода, 2019

упругом контакте вызывает рост температуры и в то же время рост температуры вызывает уменьшение коэффициента трения. Отсюда понятно, что моделирование контактного взаимодействия не может быть простым и однозначным из-за сложной взаимосвязи с технологическими параметрами. О том, что процесс прокатки построен на трении и все технологические параметры находятся в тесной взаимосвязи с ним указано и работах [1, 2, 4–6]. О влиянии трения на уширение указывают авторы в работах [7–10]. В то же время другие авторы [11–14] говорят, что при сортовой прокатке, неравномерность деформации по ширине полосы, является более существенным фактором, чем трение и его влияние при расчете уширения не учитывают.

При производстве катанки в проволочном блоке трудно дать оценку влияния режима трения на поперечное течение металла особенно при прокатке с натяжением, прежде всего из-за того, что значения этих параметров в условиях высокоскоростной непрерывной прокатки определить пока не удастся.

**Цель работы.** Целью данной статьи является исследование влияния коэффициента трения на формоизменение круглой полосы при прокатке в овальном калибре с задним натяжением.

**Постановка задачи.** Современные проволочные станы, оснащенные чистовыми блоками, позволяют осуществлять процесс прокатки катанки со скоростью 100–110 м/с. При этом трудно сказать, какое значение принимает коэффициент трения на контакте полосы с твердосплавными валками. Анализ технической литературы показывает, что с увеличением скорости горячей прокатки коэффициент трения в очаге деформации снижается. В работе [17, с. 28] приведены опытные значения коэффициента трения при горячей прокатке, согласно которым он равняется 0,17 при температуре 1000 °С и скорости прокатки 2,5 м/с. В работе [18, с. 49, рис. 20] показано, что при горячей сортовой прокатке со скоростью 30 м/с и при температуре металла 1000 °С коэффициент трения составляет 0,18. В других источниках также говорится о том, что при увеличении скорости выше 30 м/с коэффициент трения мало зависит от скорости прокатки. В работе [19, с. 368] приведена зависимость коэффициента трения при горячей прокатке полос из стали марки 08кп с подачей в очаг деформации 5%-ой эмульсии масла А20 от скорости прокатки в стальных и чугунных валках. Из графика следует, что при скорости прокатки 100 м/с коэффициент трения составляет 0,1–0,13.

Отсюда видно, что предложенная Зандером формула [20, стр. 188], описывающая характер изменения коэффициента трения при скорости прокатки выше 2 м/с, позволяет определять коэффициент трения также при скорости 100–110 м/с.

Тогда при температуре 1000 °С зависимость будет иметь вид, приведенный в виде кривой на рис. 1.

Как видно из рис. 1, увеличение скорости прокатки приводит к снижению коэффициента трения, и при скорости прокатки 100–110 м/с его

теоретическое значение в зависимости от температуры конца прокатки составляет 0,19–0,21.

В результате увеличения скорости вращения валков по ходу прокатки, контактные условия в очагах деформации разных клетей чистового блока существенно отличаются. Кроме того, из литературных источников [15, 16] известно, что между клетями чистового блока на прокатываемую полосу действует удельное натяжение величина, которого не превышает 10% от истинного предела текучести.

Снижение коэффициента трения уменьшает величину поперечной деформации [17], и увеличение заднего натяжения также снижает коэффициент уширения [17]. Однако в литературе отсутствуют данные про влияние на поперечное течение металла снижения коэффициента трения на контакте между прокатываемой полосой и валками при наличии заднего натяжения.

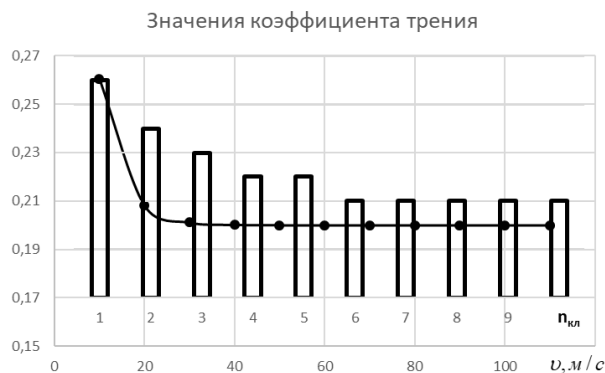


Рис. 1 – Теоретическая зависимость коэффициента трения от скорости прокатки при температуре металла 1000 °С (кривая) и распределение коэффициента трения по клетям блока при скорости катанки на выходе из него 100 м/с и температуре металла перед блоком 980 °С (диаграмма)

**Методы исследований.** Исследование влияния трения на формоизменение металла при непрерывной сортовой прокатке проводили в условиях лабораторного стана с диаметром валков 210 мм в овальном калибре шириной 8,8 мм. Для создания заднего натяжения использовали грузо-блочный механизм. В качестве заготовок использовали свинцовые и алюминиевые круглые полосы диаметром 6,5 мм (минимальный размер образца составил 6,44 мм, максимальный – 6,75 мм). Высоту калибра устанавливали в пределах от 3,62 мм до 3,91 мм, так чтобы степень деформации по соответственной полосе составляла 45 %.

При изучении совместного влияния заднего натяжения и трения на поперечное течение металла в очаге деформации масса грузов составляла 8 кг и 12 кг для свинцовых образцов, а для алюминиевых образцов – 56 кг.

Как известно, горячая сортовая прокатка осуществляется без смазки на поверхности заготовки, но так как в лабораторных условиях снижение коэффициента трения невозможно за счет увеличения

частоты вращения валков, режим трения при высокой скорости прокатки в очаге деформации имитировали нанесением на образец покрытия в виде мыльного порошка. В другом случае в качестве покрытия служил меловый порошок, при этом коэффициент трения искусственно завышали. Кроме того, опыты проводили, прокатывая обезжиренные образцы. Во всех случаях поверхность валков перед прокаткой очищали и обезжиривали. Предварительно, исходя из предельного обжатия, определяли для всех случаев прокатки коэффициент трения в начальный момент захвата. Его значения приведены в табл. 1.

Для наглядности, мел и мыло наносили на заднюю часть образца, при этом после прокатки отчетливо видно, как условия трения влияют на поперечное течение металла в очаге деформации. На рис. 2 показаны образцы с наиболее ярко выраженной разницей в уширении между сухой и покрытой мылом или мелом частями заготовок.

Таблица 1 – Значения коэффициента трения в опытах

Материал образца	Коэффициент трения, $f$		
	Покрытие образца		
	Мыльный порошок	Меловой порошок	Сухой образец
Свинец	0,07	0,43	0,28
Алюминий	0,06	0,33	0,18

Результаты экспериментальных исследований процесса прокатки круглых свинцовых и алюминиевых полос в овальном калибре при разных условиях трения и натяжения приведены на рис. 3. Здесь,  $\sigma_0$  – напряжение заднего натяжения, а  $\sigma_T$  – предел текучести при растяжении для прокатываемого материала заготовки.

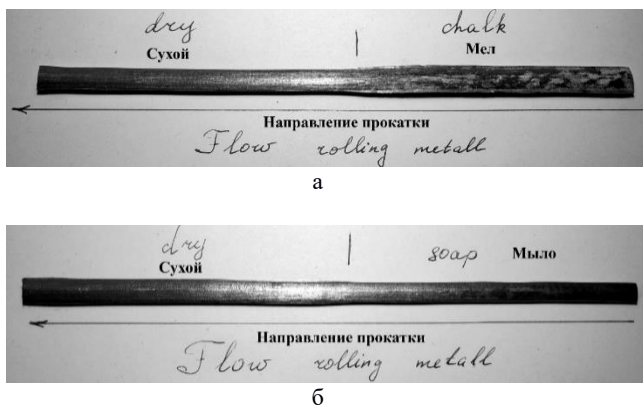


Рис. 2 – Общий вид свинцовых образцов с задней частью покрытой после прокатки: а – мелом и б – мылом

Анализ результатов исследований показывает, что условия трения в очаге деформации при прокатке круглых полос в овальных калибрах независимо от режима натяжения существенно влияют на величину поперечной деформации металла. Так, при прокатке свинцовых образцов без заднего натяжения ( $\sigma_0/\sigma_T=0$ ) увеличение коэффициента трения в очаге деформации на 0,15 приводит к увеличению абсолютного уширения на 1,26–1,52 мм, а снижение его на 0,21 – к

уменьшению абсолютного уширения на 1,79–2,01 мм. Что при ширине калибра 8,8 мм составляет, соответственно, увеличение на 14,0–17,0 % и уменьшение на 20,0–23,0 %.

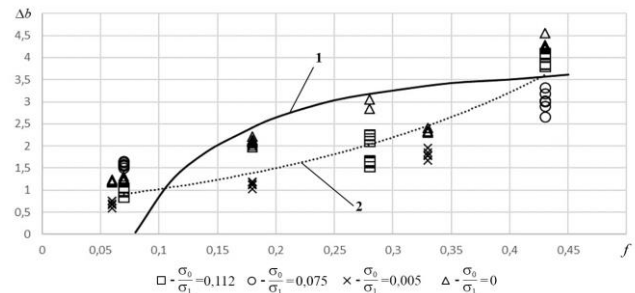


Рис. 3 – Зависимость абсолютного уширения при прокатке круглых полос в овальном калибре от коэффициента трения в очаге деформации при различных значениях напряжения заднего натяжения: 1 – кривая, построенная в соответствии с уравнением А.И. Целикова [9]; 2 – аппроксимация результатов эксперимента

При прокатке алюминиевых образцов без натяжения ( $\sigma_0/\sigma_T=0$ ) просматривается аналогичная зависимость: при увеличении коэффициента трения на 0,15 уширение увеличивается на 0,2–0,3 мм (2,3–3,4 %) и при уменьшении его на 0,12 уширение уменьшается на 0,8–1,0 мм (9,0–11,0%).

При прокатке свинцовых круглых образцов с задним относительным натяжением  $\sigma_0/\sigma_T=0,112$  (напряжение заднего натяжения 3,4 Н/мм<sup>2</sup>) увеличение коэффициента трения на контакте полосы с валками на 0,15 приводит к увеличению абсолютного уширения на 2,2–2,4 мм (25–27 %), а уменьшение коэффициента трения на 0,21 – к падению абсолютного уширения на 1,0–1,3 мм (11,0–15,0 %).

При прокатке свинцовых круглых образцов с задним относительным натяжением  $\sigma_0/\sigma_T=0,075$  (напряжение заднего натяжения 2,3 Н/мм<sup>2</sup>) уменьшение коэффициента трения на 0,21 приводит к снижению абсолютного уширения на 1,1–1,7 мм (12,5–19,3 %).

При прокатке алюминиевых образцов с относительным натяжением  $\sigma_0/\sigma_T=0,005$  (напряжение заднего натяжения 17 Н/мм<sup>2</sup>) увеличение коэффициента трения на контакте полосы с валками на 0,15 приводит к увеличению абсолютного уширения на 0,5–0,8 мм (5,7–9,1 %), а уменьшение коэффициента трения на 0,12 – к падению абсолютного уширения на 1,0–1,3 мм (11,0–15,0 %).

Во всех исследуемых случаях увеличение заднего натяжения приводит к снижению абсолютного уширения. Так при прокатке круглых свинцовых сухих образцов ( $f=0,21$ –0,28) увеличение заднего натяжения с  $\sigma_0/\sigma_T=0$  до  $\sigma_0/\sigma_T=0,112$  вызывает уменьшение абсолютного уширения на 1,3–1,9 мм. При прокатке круглых свинцовых образцов, покрытых мелом ( $f=0,43$ ), увеличение заднего натяжения с  $\sigma_0/\sigma_T=0$  до  $\sigma_0/\sigma_T=0,075$  уменьшает абсолютное

уширение на 1,3–1,5 мм, а при дальнейшем повышении заднего натяжения до  $\sigma_0/\sigma_T=0,112$  уширение повышается на 0,8–1,1 мм, но по сравнению с сухим образцом при этом наблюдается снижение абсолютного уширения на 0,4–0,5 мм. При прокатке круглых свинцовых образцов, покрытых мылом ( $f=0,07$ ), увеличение заднего натяжения с  $\sigma_0/\sigma_T=0$  до  $\sigma_0/\sigma_T=0,075$  приводит к увеличению абсолютного уширения на 0,3–0,4 мм, а дальнейшее увеличение натяжения до  $\sigma_0/\sigma_T=0,112$  снижает абсолютное уширение на 0,2–0,3 мм от абсолютного уширения сухого образца.

При прокатке сухих алюминиевых образцов ( $f=0,13-0,18$ ) увеличение относительного заднего натяжения с  $\square_0/\square_T=0$  до  $\square_0/\square_T=0,005$  приводит к снижению абсолютного уширения на 0,8–1,2 мм. При прокатке алюминиевых образцов, покрытых мелом ( $f=0,33$ ), увеличение относительного заднего натяжения с  $\square_0/\square_T=0$  до  $\square_0/\square_T=0,005$  приводит к снижению абсолютного уширения на 0,3–0,7 мм. А при прокатке алюминиевых образцов, покрытых мылом ( $f=0,06$ ), повышение заднего натяжения до  $\square_0/\square_T=0,005$  вызывает снижение абсолютного уширения на 0,4–0,6 мм.

Интересно отметить, что процессы прокатки свинцовых и алюминиевых круглых полос, покрытых мылом, в овальном калибре протекали с однозонным очагом деформации, то есть при отрицательных значениях опережения. При этом известные формулы для расчета абсолютного уширения использовать нельзя, так как все они выведены для условия наличия зоны опережения. Это хорошо видно из рис. 3 на примере теоретической зависимости по формуле Целикова [9]. Как следует из рис. 3, продольные нормальные растягивающие напряжения  $\sigma_x$ , возникающие в очаге деформации при  $\beta > 2f$ , недостаточны для появления утяжки полосы.

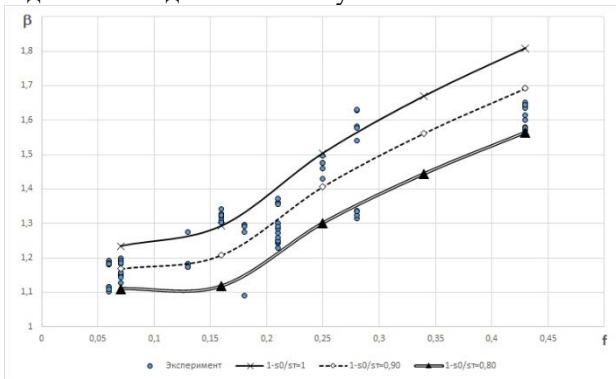


Рис. 4 – Влияние коэффициента трения на  $\beta$

В работах [12, 21] приведены экспериментальные формулы для расчёта коэффициента уширения  $\beta$  при прокатке круглых профилей в овальных калибрах. Зависимости, полученные в работе [20] учитывают влияние заднего натяжения на поперечную деформацию прокатываемого профиля. Однако, как показывают эксперименты, описанные в данной работе, помимо заднего натяжения на числовое значение коэффициента уширения при прокатке в овальном

калибре круглых заготовок существенное влияние оказывает коэффициент трения  $f$  на контакте между прокатываемым металлом и валками, а эта зависимость в предыдущих работах не учтена.

Влияние коэффициента трения на коэффициент уширения при прокатке круглых заготовок в овальных калибрах графически показано рис. 4. Как видно, в исследуемом диапазоне влияние коэффициента трения  $f$  на поперечное течение металла в очаге деформации имеет вид близкий к параболическому. В конечном итоге получена новая зависимость, которая позволяет провести расчеты коэффициента уширения при прокатке круглых полос в овальном калибре:

$$\beta = k \cdot f^{0,34} \cdot \left(1 - \frac{\sigma_0}{\sigma_T}\right)^{0,06} \beta_p, \quad (1)$$

где  $k$  – коэффициент пропорциональности;  
 $f$  – коэффициент трения в очаге деформации;  
 $\frac{\sigma_0}{\sigma_T}$  – относительное заднее натяжение;  
 $\beta_p$  – уширение, рассчитанное по формуле [12].

$$\beta_p = 0,943 + 0,113 \frac{h_0}{h_1} + 0,004 \frac{D_b}{h_1} + 0,014 \frac{B_k}{b_0}$$

где  $h_0, h_1$  – начальная и конечная высота полосы при прокатке в овальном калибре;

$D_b$  – диаметр валков по буртам;

$B_k$  – ширина калибра;

$b_0$  – ширина заготовки.

Коэффициент  $k_\sigma$  в соответствии с результатами работы [21] определяет по формуле:

$$\begin{cases} k_\sigma = 1 & \text{при } \frac{\sigma_0}{\sigma_T} = 0, \\ k_\sigma = 1,225 - 1,72 \frac{\sigma_0}{\sigma_T} + 1,729 \left(\frac{\sigma_0}{\sigma_T}\right)^2 & \text{при } \frac{\sigma_0}{\sigma_T} > 0. \end{cases} \quad (2)$$

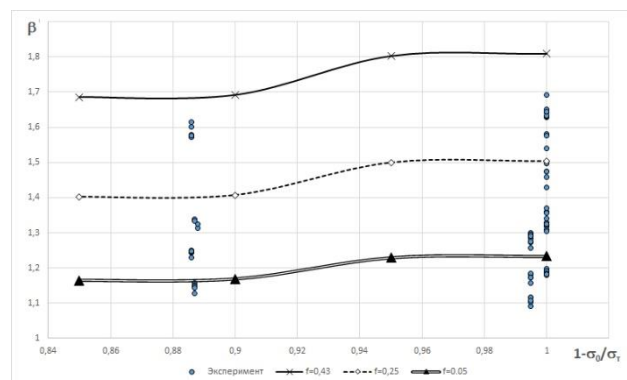


Рис. 5 – Влияние заднего натяжения на  $\beta$

Однако анализ результатов исследований данной работы показывают, что в области малых значений задних натяжений лучше использовать формулы:



$$\left\{ \begin{array}{l} \beta = 1,7f^{0,34} \left(1 - \frac{\sigma_0}{\sigma_T}\right)^{0,06} \beta_p \text{ при } \left(1 - \frac{\sigma_0}{\sigma_T}\right) \geq 0,95 \text{ и } f > 0,1 \\ \beta = 2,15f^{0,34} \left(1 - \frac{\sigma_0}{\sigma_T}\right)^{0,06} \beta_p \text{ при } \left(1 - \frac{\sigma_0}{\sigma_T}\right) \geq 0,95 \text{ и } f \leq 0,1 \\ \beta = 1,6f^{0,34} \left(1 - \frac{\sigma_0}{\sigma_T}\right)^{0,06} \beta_p \text{ при } \left(1 - \frac{\sigma_0}{\sigma_T}\right) \geq 0,85 \text{ и } f > 0,1 \\ \beta = 2,05f^{0,34} \left(1 - \frac{\sigma_0}{\sigma_T}\right)^{0,06} \beta_p \text{ при } \left(1 - \frac{\sigma_0}{\sigma_T}\right) \geq 0,85 \text{ и } f \leq 0,1 \\ \beta = 1,49f^{0,34} \left(1 - \frac{\sigma_0}{\sigma_T}\right)^{0,06} \beta_p \text{ при } \left(1 - \frac{\sigma_0}{\sigma_T}\right) < 0,85 \text{ и } f > 0,1 \\ \beta = 1,96f^{0,34} \left(1 - \frac{\sigma_0}{\sigma_T}\right)^{0,06} \beta_p \text{ при } \left(1 - \frac{\sigma_0}{\sigma_T}\right) < 0,85 \text{ и } f \leq 0,1 \end{array} \right. \quad (3)$$

Сравнение расчетных значений коэффициента уширения (кривые на графиках рис. 4 и 5) с экспериментальными данными (точки на рис. 4 и 5), показывают хорошую сходимость при значениях коэффициента трения  $f=0,05-0,45$ . Поэтому зависимость (3) можно рекомендовать для использования при расчетах поперечной деформации металла в условиях проволочного блока при прокатке катанки в промышленных условиях.

**Выводы.** 1. При прокатке круглых полос в овальных калибрах без натяжения или с задним натяжением, условия трения в очаге деформации оказывают существенное влияние на величину абсолютного уширения. Это влияние соизмеримо с влиянием натяжения.

2. При прокатке круглых полос в овальных калибрах с задним натяжением или без него с увеличением коэффициента трения в очаге деформации показатели уширения полосы увеличиваются и наоборот.

3. Характер влияния условий трения и величины заднего натяжения на показатели поперечной деформации не зависит от материала прокатываемой полосы.

4. При малых значениях коэффициента трения (меньше 0,1) процесс прокатки круглых свинцовых и алюминиевых полос в овальном калибре протекает в однозонном очаге деформации. При этом, несмотря на действие продольных нормальных растягивающих напряжений в очаге деформации, наблюдается поперечное течение металла с определенным уширением полосы.

5. Получена новая зависимость коэффициента уширения при прокатке круглых полос в овальных калибрах, в зависимости от геометрических параметров очага деформации, заднего натяжения и коэффициента трения на контакте металла с валками. Результаты работы можно рекомендовать для использования при расчетах поперечной деформации металла в условиях проволочного блока при прокатке катанки в промышленных условиях.

#### Список литературы

- Грудев А.П. Влияние трения при прокатке. Москва: Металлургия, 1973. – 288 с.
- Огинский И.К., Данченко В.Н., Самсоненко А.А., Бояркин В.В. Процессы деформации металла на основе многовалковых калибров. Днепрпетровск: Пороги, 2011. – 355 с. ISBN 978-617-518-161-4.
- Franchuk, V.P., Zibrov, K.A., Krivda, V.V., Fedorchenko, S.O. Influence of thermophysical processes on the friction properties of wheel – rail pair in the contact area. Scientific Bulletin of National Mining University. 2018, Issue 2, p46-52. DOI: 10.29202/nvngu/2018-2/7
- Радченко А.К., Гогаев К.А. Роль трения при несимметричной прокатке. Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» серія Машинобудування, 2013, №67. – С. 168–173.
- Кривенцов А.М. Разработка метода и определение на его основе коэффициента трения при горячей, теплой и холодной прокатке черных и цветных металлов. Калибровочное бюро, 2013, №6, С. 40–49.
- Святовец К.В. Исследование формул уширения. Высшая школа, 2016, №21. – С. 68–73.
- Губкин С.И. Теория обработки металлов давлением. Москва: Металлургиздат, 1947. – 532 с.
- Бахтинов Б.П. Калибровка прокатных валков. М.: Металлургиздат, 1953. матеріалів у машинобудуванні та металургії, № 26(1351), 2019. – 780 с.
- Целиков А.И., Томленов А.Д., Зюзин В.И., Третьяков А.В., Никитин Г.С. Теория прокатки. Справочник. – М.: Металлургия, 1982. – 335 с.
- Ekelund S. Analysis of Factors Influencing Rolling Pressure and Power Consumption in the Hot Rolling Steel. Steel. 1933, 33, P. 27–29
- Павлов И.М., Потоскуев М.Н. Вынужденная поперечная деформация при прокатке в разрезных калибрах. Материалы по теории прокатки, 1960, №5. С. 469–481.
- Штода М.Н., Ершов С.В., Геймур К.Г., Самохвал В.М., Гаврилин С.Ю. Уширение при прокатке в калибрах вытяжной системы «овал – круг». Вісник Нац. техн. ун-ту «ХПІ» : зб. наук. пр. Сер. : Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 30 (1202). – С. 79–87.
- Кинзин Д.И., Моллер А.Б., Рычков С.С. Выбор методики расчета уширения при моделировании прокатки сортовых профилей простой формы. Известия ВУЗов. Черная Металлургия. 2012, №55(10). – С. 32–35. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2012-10-32-35>
- Харитонов В.А., Таранин И.В. Анализ напряженно-деформированного состояния в очаге деформации при прокатке катанки в различных системах калибров на основе моделирования методом конечных элементов. Известия ВУЗов. Черная Металлургия. 2013; 56(2). – С. 26–30. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2013-2-26-30>
- Горбанёв А.А., Жучков С.М., Филиппов В.В. и др. Теоретические и технологические основы высокоскоростной прокатки катанки. Минск: Выш. шк., 2003. – 287 с. – ISBN 985-06-0793-9.
- Тимошпольский В.И., Андрианов Н.В., Жучков С.М. и др. Производство высокоуглеродистой катанки на металлургических агрегатах высшего технического уровня. Минск: Бел. наука, 2004. – 238 с. – ISBN 985-08-0617-6.
- Целиков А.И., Гришков А.И. Теория прокатки. М.: Металлургия, 1970. – 360 с.
- Иводитов А.Н., Горбанев А.А. Разработка и освоение технологии производства высококачественной катанки. М.: Металлургия, 1989. – 256 с.
- Капранов В. И. Динамика и трибоника высокоскоростной тонколистовой прокатки. Мировая тенденция и перспектива: Монография Мариуполь: Изд-во «Рената», 2008. – 456 с.
- Хензель А., Шпиттель Т. Расчет энергосиловых параметров в процессах обработки металлов давлением. М.: Металлургия, 1982. – 360 с.
- Штода М. Н., Максименко О. П., Чудновец А. Н. Коэффициент уширения при прокатке полос в системе калибров "овал–круг" с задним удельным натяжением. Збірник наукових праць Дніпровського державного технічного університету. Технічні науки. – 2018. – Вип. Тем. вип. – С. 132–138.

## References (transliterated)

1. Grudev A.P. Vliyanie treniya pri prokatke. Moscow: Metallurgiya, 1973. – 288 p.
2. Oginskiy I.K., Danchenko V.N., Samsonenko A.A., Boyarkin V.V. Protsesty deformatsii metalla na osnove mnogovalkovyih kalibrov. Dnepropetrovsk: Porogi, 2011. – 355 p. ISBN 978-617-518-161-4.
3. Franchuk, V.P., Zibrov, K.A., Krivda, V.V., Fedorchenko, S.O. Influence of thermophysical processes on the friction properties of wheel – rail pair in the contact area. Scientific Bulletin of National Mining University . 2018, Issue 2, p. 46–52. DOI: 10.29202/nvngu/2018-2/7
4. Radchenko A.K., Gogaev K.A. Rol treniya pri nesimmetrichnoy prokatke. Visnik Natsionalnogo tehnicnogo universitetu Ukrainy «Kiyivskiy politehnicnij institut» seriya Mashinobuduvannya, 2013, 67, 168-173.
5. Kriventsov A.M. Razrabotka metoda i opredelenie na ego osnove koeffitsienta treniya pri goryachey, teploy i holodnoy prokatke chernyih i tsvetnyih metallov. Kalibrovochnoe byuro, 2013, 6, 40–49.
6. Svyatovets K.V. Issledovanie formul ushireniya. Vysshaya shkola, 2016, 21, 68–73.
7. Gubkin S.I. Teoriya obrabotki metallov davleniem. Moskva: Metallurgizdat, 1947. – 532 p.
8. Bahtinov B.P. Kalibrovka prokatnyih valkov. Moscow: Metallurgizdat, 1953. – 780 p.
9. Tselikov A.I., Tomlenov A.D., Zyuzin V.I., Tretyakov A.V., Nikitin G.S. Teoriya prokatki. Spravochnik. – Moscow: Metallurgiya, 1982. – 335 p.
10. Ekelund S. Analysis of Factors Influencing Rolling Pressure and Power Consumption in the Hot Rolling Steel. Steel. 1933, 33, P. 27–29
11. Pavlov I.M., Potoskuev M.N. Vyinzhdennaya poperechnaya deformatsiya pri prokatke v razreznyih kalibrah. Materialy po teorii prokatki, 1960, 5, 469–481.
12. Shtoda M.N., Ershov S.V., Geymur K.G., Samohval V.M., Gavrilin S.Yu. Ushirenje pri prokatke v kalibrah vytyazhnoy sistemy "oval – krug". VIsnik Nats. tehn. un-tu "HPI": zb. nauk. pr. Ser.: Innovatsijni tehnologiyi ta obladnannya obrobki materijaliv u mashinobuduvanni ta metalurgiyi – KHarkiv : NTU "HPI", 2016. – 30 (1202). – P. 79-87.
13. Kinzin D.I., Moller A.B., Ryichkov S.S. Vybor metodiki rascheta ushireniya pri modelirovanii prokatki sortovyih profiley prostoy formy. Izvestiya Vysshih Uchebnyih Zavedeniy. Chernaya Metallurgiya. 2012, 55(10), 32-35. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2012-10-32-35>
14. Haritonov V.A., Taranin I.V. Analiz napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya v ochage deformatsii pri prokatke katanki v razlichnyih sistemah kalibrov na osnove modelirovaniya metodom konechnyih elementov. Izvestiya Vysshih Uchebnyih Zavedeniy. Chernaya Metallurgiya. 2013; 56(2), 26-30. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2013-2-26-30>
15. Gorbanyov A.A., Zhuchkov S.M., Filippov V.V. i dr. Teoreticheskie i tehnologicheskie osnovy vyisokoskorostnoy prokatki katanki. Minsk: Vysh. shk., 2003. – 287 p. – ISBN 985-06-0793-9.
16. Timoshpolskiy V.I., Andrianov N.V., Zhuchkov S.M. i dr. Proizvodstvo vyisokouglerodisty katanki na metallurgicheskikh agregatah vyisshego tehniceskogo urovnya. Minsk: Bel. navuka, 2004. – 238 p. – ISBN 985-08-0617-6.
17. Tselikov A.I., Grishkov A.I. Teoriya prokatki. M.: Metallurgiya, 1970. – 360 p.
18. Ivoditov A.N., Gorbanev A.A. Razrabotka i osvoenie tehnologii proizvodstva vyisokokachestvennoy katanki. Moscow: Metallurgiya, 1989. – 256 p.
19. Kaplanov V. I. Dinamika i tribonika vyisokoskorostnoy tonkolistovoy prokatki. Mirovaya tendentsiya i perspektiva: Monografiya Mariupol: Izd-vo «Renata», 2008. – 456 p.
20. Henzel A., Shpittel T. Raschet energosilovyih parametrov v protsessah obrabotki metallov davleniem. Moscow: Metallurgiya, 1982. – 360 p.
21. Shtoda M. N., Maksimenko O. P., Chudnovets A. N. Koeffitsient ushireniya pri prokatke polos v sisteme kalibrov "oval – krug" s zadnim udelnyim natyazheniem. ZbIrnik naukovih prats DnIprovskogo derzhavnogo tehnicnogo unIversitetu. Tehnicnl nauki. – 2018. – Vip. Tem. vip. – P. 132-138.

*Поступила (received) 10.12.2019*

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

**Штода Максим Миколайович (Штода Максим Николаевич, Shtoda Maksim Nikolayevych )** – кандидат технічних наук, доцент, Дніпровський державний технічний університет, доцент кафедри ОМТ ім. Б.М. Люковича, м. Кам'янське; тел.: (099) 779-56-26; e-mail: maksshtoda@gmail.com.

## ЗМІСТ

<b>Григоренко І. В., Григоренко С. М., Вовк Л. О.</b> Дослідження контрольно-вимірювального обладнання за допомогою системи Fuzzy-Logic.....	3
<b>Капюжний В. Л., Марчук К. Л.</b> Напружено-деформований стан металу при холодному видавлюванні коробчатих виробів з пластичного алюмінію.....	10
<b>Лось А. В.</b> Реализация глубоких модификационных изменений в отечественных ВТС: АН-132Д, АН-178 и АН-188....	16
<b>Нарыжний А. Г., Тараненко М. Е.</b> Исследование процесса последовательного деформирования листовой заготовки при электрогидравлическом нагружении.....	21
<b>Ноздрачова К. Л.</b> Комбіновані ємнісні перетворювачі для контролю імпульсами ультразвукових хвиль Релея фізико-механічних властивостей металовиробів.....	28
<b>Плеснецов Ю. А., Сучков Г. М., Плеснецов С. Ю.</b> Определение критического радиуса места изгиба при формовке гнутых профилей.....	36
<b>Полянский В. И.</b> Теоретический анализ путей повышения качества и производительности механической обработки.....	42
<b>Романюк С. П.</b> Разработка технологического процесса восстановления поверхности деталей из высокоуглеродистой легированной стали.....	47
<b>Савченко Н. Ф., Дитиненко С. А., Дементеева Я. Ю.</b> Повышение качества изготовления осесимметричных изделий методами беспрессовой импульсной штамповки.....	52
<b>Салам Буссі, Плеснецов С. Ю.</b> Практичні розробки електромагнітно-акустичних перетворювачів.....	57
<b>Смолін Ю. О.</b> Результати дослідження характеристик датчика тиску комп'ютерної системи діагностики ДВЗ.....	66
<b>Шерфедінов Р. Б., Іщенко М. Г., Сластьон Л. О., Альохіна С. В.</b> Підвищення економічності та надійності ЦНТ потужних парових турбін.....	72
<b>Штода М. Н.</b> Влияние коэффициента трения на коэффициент уширения при прокатке круглых полос в овальном калибре с задним натяжением.....	78

## CONTENT

<b>Hrihorenko I. V., Hrihorenko S. M., Vovk L.O.</b> Research of monitoring and measuring equipment using the Fuzzy-Logic system.....	3
<b>Kaliuzhnyi V. L., Marchuk K. L.</b> Stress-deformed steel of metal in cold woodworking of corborated articles of plastic aluminum.....	10
<b>Los A. V.</b> Deep implementation results modification changes in domestic MTA: AN-132D, AN-178 and AN-188.....	16
<b>Naryzny F. G., Taranenko M. Ye.</b> Investigation of the process of sequential deformation of the sheet billet under electrohydraulic loading.....	21
<b>Nozdrachova K. L.</b> Combined capacity transducers for the testing of the ultrasonic Relay waves of the physico-mechanical properties of metal products.....	28
<b>Plesnetsov Yu. A., Suchkov G. M., Plesnetsov S. Yu.</b> Determination of critical radius of the bend when forming bent profiles.....	36
<b>Polyanskiy V. I.</b> Theoretical analysis of ways to improve quality and productivity of machining.....	42
<b>Romaniuk S. P.</b> Development of technological process for restoring the surface of tools made of high-carbon alloy steel.....	47
<b>Savchenko N. F., Ditinenko S. A., Dementeyeva Y. Yu.</b> Improving the quality of manufacture of axisymmetric products by methods of a pressless pulse stamping.....	52
<b>Salam Bussi, Plesnetsov S. Yu.</b> Practical development of electromagnetic-acoustic converters.....	57
<b>Smolin Yu. A.</b> Research results of pressure sensor characteristics computer ice diagnostic systems ICE.....	66
<b>Sherfedinov R., Ishchenko M., Slaston L., Alyokhina S.</b> Enhancement of cost-effectiveness and reliability of LPCS of powerful steam turbine.....	72
<b>Shtoda M. N.</b> The influence of the friction coefficient on the broadening coefficient when rolling round strips in an oval caliber with rear tension.....	78

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

**ВІСНИК НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ «ХП».**  
**СЕРІЯ: ІННОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ОБЛАДНАННЯ ОБРОБКИ МАТЕРІАЛІВ**  
**У МАШИНОБУДУВАННІ ТА МЕТАЛУРГІЇ**  
**Збірник наукових праць**  
**№ 26(1351) 2019**

Наукові редактори: Марченко А.П., д-р техн. наук, професор, НТУ «ХП», Україна,  
Плеснецов Ю.О., канд. техн. наук, ст. н. с., НТУ «ХП», Україна  
Технічний редактор: Курандо О.С., інженер I категорії, НТУ «ХП», Україна

**АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ:** 61002, Харків, вул. Кирпичова, 2, НТУ «ХП».  
Кафедра обробки металів тиском  
Тел.: (057) 707-60-40; e-mail: omd.conf@gmail.com

Обл.-вид. № 13-19.

Підп. до друку 20.12.2019 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 «ХП».  
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.