

**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**

№ 11 (1336) 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 11 (1336) 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. – № 11 (1336) 2019. – 96 с. – ISSN 2519-2671.

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

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

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

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

Державне видання.

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

Мова статей – українська, російська, англійська.

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

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

Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

Founder
National Technical University
"Kharkiv Polytechnic Institute"

Головний редактор

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

Заст. головного редактора

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

Секретар

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

Редакційна колегія серії

Відповідальний редактор:

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

Заступник відповідального редактора:

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

Відповідальний секретар:

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

Члени редколегії:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Editor-in-chief

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

Deputy editor-in-chief

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

Secretary

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

The editorial board of the series:

Editor:

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

Deputy managing editor:

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

Secretary:

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

Members of the Editorial Board:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», 2019

УДК 621.774.8

*О. С. АНИЩЕНКО, В. В. КУХАР, А. Г. ПРИСЯЖНИЙ, М. Г. КОРЕНКО, Ю. Г. САГИРОВ***РОТАЦІЙНА РОЗДАЧА КВАДРАТНИХ РОЗТРУБІВ НА ТОРЦЯХ ЦИЛІНДРИЧНИХ ТРУБ**

В статті проаналізовані найпоширеніші технології виготовлення гранованих, зокрема, квадратних розтрубів на торцях круглих труб, виявлені їх переваги і недоліки та сформульована доцільність використання технології ротаційної роздачі таких розтрубів. Наведені нові аналітичні формули для розрахунків контурів поперечного перетину інструментів для ротаційної роздачі. За цими формулами можна точніше розраховувати контури трикутника Рьоло, а також краплі, що падає, в перетинах інструменту, що деформує торець труби за рахунок складного обертання біля двох центрів. Вказано, що при ротаційній роздачі неможливо отримати розтруб з перетином у вигляді квадрата ідеальної форми. В кутах квадрата суміжні його сторони будуть сполучатися за певним радіусом спряження, який залежить від відносних розмірів сторін трикутника Рьоло, краплі, відстані між центрами обертання інструменту і стороною розтруба. Експериментами по ротаційній роздачі квадратних розтрубів на алюмінієвих циліндричних трубах доведена доцільність використання інструменту з контуром краплі в поперечному перерізі та формул для розрахунків його розмірів. Запропонована суперформула Йохана Геліса для створення належного контуру краплі за даними нових формул, наведених в статті. Суперформула є універсальною для всіх видів інструментів, що використовують при ротаційній роздачі гранованих розтрубів, і дозволяє конструювати шаблони, за допомогою яких копірально-фрезерними роботами виготовляють деформуючий інструмент.

Ключові слова: ротаційна роздача, труба, розтруб, квадратний, контур, інструмент, суперформула, трикутник Рьоло, крапля, сочевиця.

*А. С. АНИЩЕНКО, В. В. КУХАРЬ, А. Г. ПРИСЯЖНИЙ, М. Г. КОРЕНКО, Ю. Г. САГИРОВ***РОТАЦИОННАЯ РАЗДАЧА КВАДРАТНЫХ РАСТРУБОВ НА ТОРЦАХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ТРУБ**

В статье проанализированы наиболее распространенные технологии изготовления граненых, в частности, квадратных раструбов на торцах круглых труб, выявлены их преимущества и недостатки и сформулирована целесообразность использования технологии ротационной раздачи таких раструбов. Приведенные новые аналитические формулы для расчетов контуров поперечного сечения инструментов для ротационной раздачи. По этим формулам можно точнее рассчитывать контуры треугольника Рело, а также падающей капли в сечениях инструмента, деформирующего торец трубы за счет сложного вращения около двух центров. Указано, что при ротационной раздаче невозможно получить раструб с сечением в виде квадрата идеальной формы. В углах квадрата его смежные стороны будут сопрягаться по определенному радиусу, который зависит от относительных размеров сторон треугольника Рело и капли, а также расстояния между центрами вращения инструмента и стороной раструба. Экспериментами по ротационной раздаче квадратных раструбов на алюминиевых цилиндрических трубах доказана целесообразность использования инструмента с контуром капли в поперечном сечении и формул для расчетов его размеров. Предложена суперформула Йохана Геліса для создания надлежащего контура капли по данным формул, приведенных в статье. Суперформула является универсальной для всех видов инструментов, которые используют при ротационной раздаче граненых раструбов, и позволяет конструировать шаблоны, с помощью которых копірально-фрезерными работами изготавливают деформирующий инструмент.

Ключевые слова: ротационная раздача, труба, раструб, квадратный, контур, инструмент, суперформула, треугольник Рело, капля, чечевица.

*О. S. ANISHCHENKO, V. V. KUKHAR, A. H. PRYSYAZHNYI, M. G. KORENKO, Yu. G. SAHIROV***ROTATIONAL FLARING OF SQUARE TRUMPET AT THE BUTT-END OF CYLINDRICAL PIPES**

The article analyzes the most common technologies for the manufacture of faceted, in particular, square trumpet at the ends of round pipes, identifies their advantages and disadvantages and formulates the feasibility of using the technology of rotational flaring of such trumpet. The new analytical formulas for calculating the cross-section contours of tools for rotational flaring are given. Using these formulas, you can more accurately calculate the contours of the Reuleaux triangle, as well as the falling drop in the cross sections of the tool that deforms the end of the pipe due to complex rotation about two centers. It is indicated that with the rotational flaring it is impossible to obtain a trumpet with a cross section in the form of a square of ideal shape. In the corners of a square, its adjacent sides will mate along a certain radius, which depends on the relative sizes of the sides of the Reuleaux triangle and the drops, as well as the distance between the centers of rotation of the tool and the side of the trumpet. Experiments on the rotational flaring of square trumpet on aluminum cylindrical pipes proved the feasibility of using a tool with a drop contour in cross section and formulas for calculating its dimensions. A Giels superformula was proposed for creating a proper drop contour according to the formulas given in the article. The superformula is universal for all types of tools for rotational flaring and allows you to make templates used in copying and milling operations in the manufacture of deforming tools.

Key words: rotational expansion, pipe, trumpet, square, contour, tool, superformula, Reuleaux triangle, drop, lentils.

Вступ. Грановані розтруби квадратного, прямокутного або шестигранного перерізу виготовляють багатоперехідною роздачею кінцевих ділянок циліндричних труб на пресах, якщо використовують заготовки відносно невеликого діаметру та малої довжини. На заготовках великого діаметру (наприклад, для з'єднання компресорів з повітряними провадами для вентиляції) розтруби виготовляють зварюванням або фальцюванням декількох задалегідь гнутих пелюсток (рис. 1).

Технології характеризуються великою трудомісткістю.

Аналіз стану питання. Для умов дрібносерійного виробництва одним з можливих способів виготовлення гранованих, зокрема, квадратних розтрубів на трубах практично необмеженої довжини і досить великого діаметру є ротаційна роздача (РР) торців труб деформуючим інструментом, що має в перетині форму трикутника Рьоло (Reuleaux) і обертається одночасно навколо двох центрів [1, 2]. Утворений на торці труби

© О. С. Аніщенко, В. В. Кухар, А. Г. Присяжний, М. Г. Коренко.
Ю. Г. Сагіров, 2019

розтруб в поперечному перерізі має форму квадрата із закругленими кутами – супереліпса або сквірка [3].

Радіус заокруглення кутів залежить від співвідношення сторони квадрата і трикутника Рьоло, а також відстані між центрами обертання деформуючого інструменту.



Рис. 1 – Квадратні та прямокутні розтруби на циліндричних трубах

Експерименти по РР квадратних розтрубів на алюмінієвих трубах [1] показали, що спроба зменшити радіус заокруглення кутів квадрата призводить до збільшення кривизни (опуклості) його сторін через недостатню жорсткість обладнання та неузгодженості швидкостей обертання труби та інструменту. Були виконані розрахунки кінематичних параметрів технології РР і геометричних розмірів деформуючого інструменту. Спочатку при аналітичних розрахунках радіуса кривизни і числа сторін M -кутника в перерізі інструменту виходили з умов:

1) інструмент при РР в точності оформляє кути розтруба;

2) в деформованому розтрубі є відхилення його сторони від ідеальної прямої з максимумом в центрі цієї сторони.

Для усунення цього відхилення була запропонована формула [4], згідно з якою слід змінити радіус кривизни сторін трикутника Рьоло в перерізі інструменту.

Спроектвані в подальшому більш жорсткі пристрої, які забезпечували, в тому числі, гарантоване співвідношення кутових швидкостей обертання інструменту навколо двох центрів [5, 6], дозволили зменшити опуклість сторін торців і радіус їх спряження в кутах розтрубів.

Аналіз кінематики відносного руху труби і інструменту в розглянутій технології РР показав [4], що в більш загальному вигляді N -гранні розтруби можна роздавати інструментом з числом кутів в перерізі $M \leq (N-1)$. При цьому необхідно виконання співвідношення:

$$\frac{\beta}{\gamma} = 1 - \frac{N}{M} \quad (1)$$

де β – кутова швидкість обертання осі інструменту, що має M -кутник в перерізі, щодо центру N -гранного розтруба (осі труби)

γ – кутова швидкість обертання вершин M -кутника щодо осі труби.

Наприклад, шестигранний розтруб може бути виготовлений роздачею деформуючими інструментами, які обертаються навколо двох центрів і мають в перерізі контури кривих Персея (рис. 2). Зокрема, такими контурами можуть бути [7]: а) правильний опуклий чотирикутник; б) трикутник Рьоло; в) двокутник в формі сочевиці. Пізніше переважно для пристроїв [5] був винайдений інструмент, що має в перерізі контур однокутника в формі падаючої краплі [8].

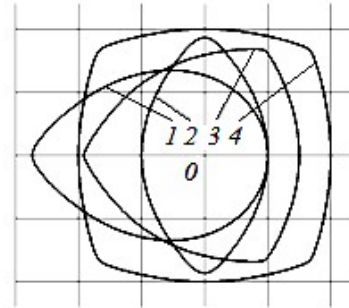


Рис. 2 – Контури перерізу деформуючого інструменту для ротаційної роздачі:

- 1 – крапля ($M = 1$), 2 – сочевиця ($M = 2$),
3 – трикутник Рьоло ($M = 3$), 4 – сквірка ($M = 4$)

Подальші дослідження показали, що точне оформлення кутів розтрубів металом, що деформується, неможливо як через інтенсивне «завалювання» гострих кутів сполучення суміжних поверхонь інструменту, так і в зв'язку з наявністю мінімально можливого радіуса заокруглення для деформованого металу. Крім того, при аналітичних розрахунках розмірів розтрубів з урахуванням наявності більш точного обладнання [5, 6] необхідно виключити умову відхилення сторони деформованого розтруба від ідеальної прямої. Інакше кажучи, слід ввести припущення, що контури N -гранних розтрубів, утворених при РР, збігаються з контурами сторін правильних N -гранників, а кути розтрубів оформляються трубою, що деформується, з певним радіусом кривизни. Таким чином, деформований розтруб по відношенню до правильного N -гранника буде вписаним в нього, тоді як при попередніх розрахунках передбачалося, що розтруби описують контури N -гранника.

Мета роботи – розрахунок контуру і розмірів перерізу деформуючого інструменту у формі падаючої краплі для ротаційної роздачі квадратних розтрубів на циліндричних трубах.

Основна частина. РР квадратних розтрубів деформуючим інструментом, що має трикутник Рьоло в перерізі (рис. 3), забезпечує найбільш точні розміри розтрубів, якщо медіана трикутника Рьоло дорівнює відстані між протилежними гранями розтруба.

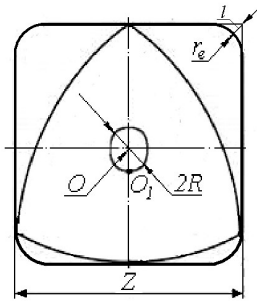


Рис. 3 – Схема створення контуру сквірка обертанням трикутника Рьоло

В цьому випадку для роздачі квадратного розтрубу зі стороною Z інструмент повинен обертатися навколо центра O_1 описаної біля трикутника Рьоло окружності, а центр O_1 – навколо центра труби O відповідно до співвідношення (1) в протилежну сторону і в три рази швидше. Відстань між центрами R дорівнює [9]:

$$R = \left(\frac{1}{\sqrt{3}} - \frac{1}{2} \right) Z \sim 0,077Z. \quad (2)$$

Кожна вершина трикутника Рьоло при складному обертанні навколо двох центрів описує в кутах квадрата дугу еліпса, який має на цих ділянках радіус r_e , що дорівнює:

$$r_e = \left(\frac{2 - \sqrt{3}}{2} \right) Z \sim 0,13Z \quad (3)$$

Строго кажучи, контур, створений обертанням трикутника Рьоло, є сквірком, а відстань вздовж діагоналі квадрата від контуру сквірка до кута квадрата l з урахуванням (3) визначається за формулою:

$$l = Z \left(1 - \frac{\sqrt{3}}{2} \right) (\sqrt{2} - 1) \sim 0,055Z. \quad (4)$$

Розглянемо процес РР квадратного розтрубу зі стороною $2A$ на торці циліндричної труби за допомогою інструменту з поперечним перерізом у вигляді краплі, що падає (рис. 4). Обертання краплі навколо двох центрів O і O_1 характеризується або силовим контактом її контуру з однією із сторін квадрата, або формоутворенням по радіусу r_k зон спряження сторін квадрата контурами ділянок, що прилегли до кута краплі. Для визначення параметрів контуру краплі, що деформує торець труби, достатньо розглянути процес формоутворення квадратного розтрубу в межах кута повороту $\beta = 0 \dots 45^\circ$. При цих кутах розраховується перша половина контуру краплі, інша її половина буде симетричним відображенням першої відносно осі FO_1N (рис. 4а).

Поворот центру O_1 навколо центра O на кут $\beta = 45^\circ$ (рис. 4в) супроводжується поворотом краплі

навколо центру O_1 в протилежну сторону на кут $\alpha = 180^\circ = -4\beta$ щодо рухомої осі O_1O . При цьому за принципом суперпозиції $\gamma = \alpha + \beta = -180^\circ + 45^\circ = -135^\circ$, тобто $\gamma = -3\beta$, що відповідає співвідношенню (1).

Особливістю формоутворення квадратного контуру краплею є те, що вершина краплі F до та після оформлення кутових контурів квадрату по радіусу r_k не повинна при подальшому обертанні віддалятися від осей x , і y на відстань, що перевищує A .

Контур, який створює точка F при обертанні навколо центрів O і O_1 (рис. 5) в параметричному вигляді описується формулами:

$$x = R \cos \beta - k \cos(-3\beta); \quad (5)$$

$$y = R \sin \beta - k \sin(-3\beta). \quad (6)$$

Прирівнявши до нуля похідні x' та y' по куту β , отримаємо значення кутів β_y , β_x , при яких точка F має координати $y_{\beta_y} = A$ (рис. 4б) і $x_{\beta_x} = A$.

$$\beta_x = \arcsin \sqrt{\frac{9k-R}{12k}}, \quad (7)$$

$$\beta_y = \arccos \sqrt{\frac{9k-R}{12k}}, \quad (8)$$

де R – радіус обертання краплі навколо центру O квадрата;

k – відстань від центру O_1 краплі вздовж осі FN до її вершини (кута).

Між цими кутами β_x , β_y контур розтрубу буде оформлений по радіусу r_k , який визначається за формулою:

$$r_k = \frac{(x'^2 + y'^2)^{3/2}}{y''x' - y'x''}, \quad (9)$$

де x'' та y'' – другі похідні по x та y .

Контури, що зображені на рис. 5, показують, що при заданому A недоцільно вибирати $R < 0,6A$ через занадто великий проміжок s між кутом квадрата та контуром, який має радіус r_k . З іншого боку, проміжок s не може бути як завгодно малим, оскільки значення r_k лімітовані пластичністю матеріалу труби та формою інструменту.

Радіус r_k тим менше, чим більше R і менше k (рис. 5). Занадто велика відстань R між центрами обертання краплі обумовлює досить малі величини радіусу r_k та кута при вершині F краплі, тобто й мале значення s . Це може привести, по-перше, до зминання або руйнування занадто гострого кута F краплі, а по-друге, до виникнення тріщин в розтрубі із-за силового впливу цього кута на матеріал труби.

Отже оптимальним буде діапазон $R = (0,6 - 0,8)A$ і, відтак, $r_0 = A - R = (0,4 - 0,2)A$.

Для відтворення прямолінійних сторін розтрубу при обертанні краплі її розмір r_β (рис. 4а) повинен в межах кутів $\beta = 0 - \beta_y$ і $\beta = \beta_x - 90^\circ$ (рис. 5) відповідати співвідношенню:

$$r_\beta = \frac{A - R \cos \beta}{\cos \beta}. \quad (10)$$

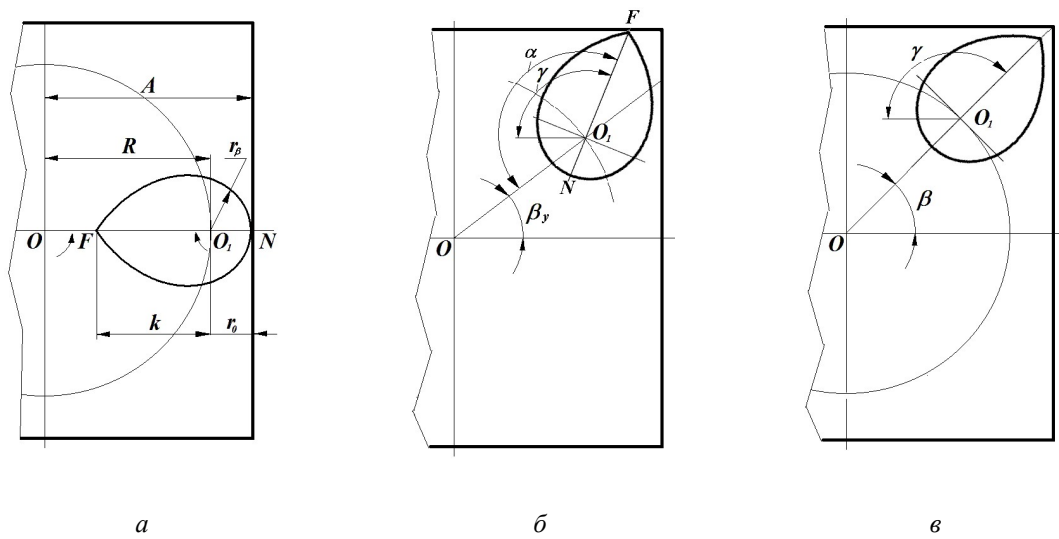


Рис. 4 – Стадії оформлення квадратного контуру розтруба краплею, що обертається:
 $A = 10, R = 8, k = 5,55, r_o = 2$; а) $\beta = 0^\circ$; б) $\beta = 37,47^\circ$; в) $\beta = 45^\circ$ обертання

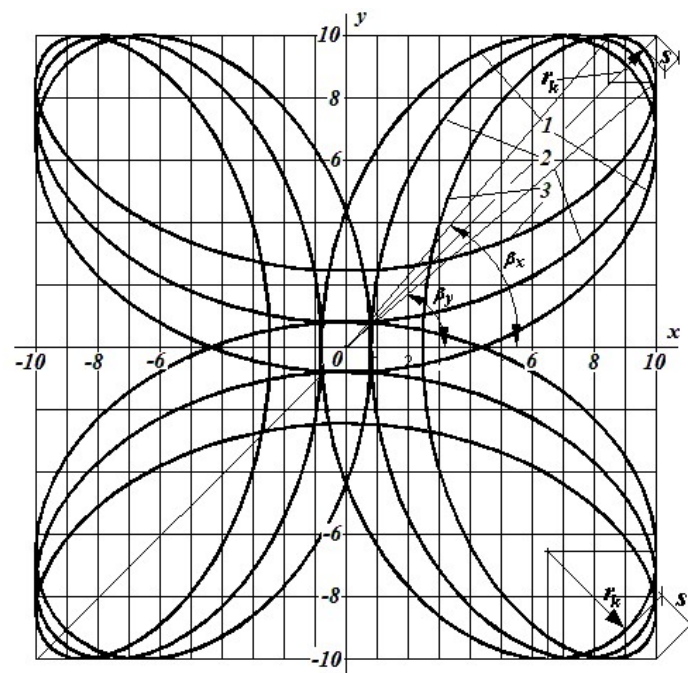


Рис. 5– Контури, які створює вершина F краплі при складному обертанні навколо центрів O і O_1 згідно з формулами (5)...(8) для роздачі квадратного розтрубу з $A=10$: 1 – $R = 6, k = 6,8$; 2 – $R = 7, k = 6,2$; 3 – $R = 8, k = 5,55$

В межах кутів $\beta = \beta_y \dots \beta_x$ контур розтрубу створюється кутом краплі F .

Але при виготовленні інструменту контур краплі доцільно будувати не за формулою (10), а як функцію радіуса r_β , що обертається навколо центру O_I . Оскільки швидкість обертання краплі навколо центру O_I в три рази більше, ніж навколо центру O , то значення r_β , отримані за формулою (10), відносяться до кутів обертання навколо центру O_I , які втричі більші, ніж кути β . Тобто значення r_β , наприклад, для кутів $\beta = 0 \dots 37,47^\circ$ (рис. 4) при побудові краплі відповідають інтервалу кутів $-3\beta = 0 \dots -112,41^\circ$. Між кутами в інтервалі $-112,41^\circ \dots -180^\circ$ контур краплі повинен бути прямою лінією (тобто не опуклим), тому що формоутворення розтрубу здійснюється тільки силовим впливом кута F краплі. В межах кутів $-180^\circ \dots -360^\circ$ контур краплі симетричний відносно осі $FO_I N$.

Для опису контурів деформуючих інструментів (рис. 2), крім співвідношень (5)...(10), використовувалися формули [1, 4, 7] з різними точками відліку і системами координат. Однак існує універсальне рівняння – суперформула Й. Геліса (J. Gielis) [3], яка дозволяє описувати всі можливі форми перерізу деформуючого інструменту (рис. 2), наприклад, в полярних координатах як функцію радіус-вектору r_G від кута β при відповідних розрахунках значень коефіцієнтів, що входять в суперформулу:

$$r_G = \left\{ \left[\left(\left| \frac{1}{a} \cos \left(\frac{K}{4} \beta \right) \right| \right)^{n_2} + \right]^{\frac{1}{n_1}} + \left[\left(\left| \frac{1}{b} \sin \left(\frac{K}{4} \beta \right) \right| \right)^{n_3} \right]^{\frac{1}{n_1}} \right\}^{\frac{1}{n_1}}, \quad (11)$$

де n_1, n_2, n_3 – коефіцієнти, що визначають форму кривої;

a, b – габарити (величини напівосей);

K – коефіцієнт, який визначає число фрагментів, що повторюються.

Для експериментальної перевірки отриманих розрахунків на прикладі РР квадратних розтрубів зі стороною $2A = 200$ мм на торцях труб $\varnothing 180 \times 2,5$ мм і $\varnothing 190 \times 2,5$ мм з алюмінієвого сплаву АД1 був виготовлений конусний інструмент. Контур поперечного перерізу в інструменті виготовляли за допомогою шаблону, який мав форму краплі, створену суперформулою (11) на основі розрахунків за формулами (5)...(10). Для цих розрахунків використовували вихідні параметри: $R = 80$ мм, $k = 55,5$ мм, $r_o = 20$ мм, $\beta_x \sim 37,5^\circ$, $\beta_y \sim 52,5^\circ$, $r_k = 22,8$ мм при $\beta = 45^\circ$ і $r_k = 21,7$ мм при $\beta_x \sim 37,5^\circ$ і $\beta_y \sim 52,5^\circ$. З урахуванням наведених параметрів суперформула апроксимації мала наступні значення коефіцієнтів: $a = b = 9$, $K = 0,68$, $n_1 = 3,21$, $n_2 = n_3 = 22$.

Порівняння експериментальних та розрахункових даних показало, що контури розтрубів на центральних ділянках сторін практично співпадають (похибка не перевищує 8 %). Радіуси r_k в експериментах на трубах діаметром 180 мм і 190 мм коливаються в межах відповідно 22,5...25,5 мм і 22,0...24,5 мм. Отже вони тим більше співпадають з розрахунковими величинами, чим менше відрізняється діаметр труби від сторони розтрубу.

Недоліком інструменту з контуром краплі в перерізі є нерівномірне зношення його бокових поверхонь, які деформують центральні зони розтрубу обкочуванням, а кутові – обкочування з ковзанням. В наслідок ковзання більш інтенсивно зношуються ділянки, суміжні з конусним ребром інструменту, яке виникло в ньому з-за наявності вершини краплі. При цьому гострий кут краплі перетворюється в радіусний контур, частково зменшується точність розмірів розтрубу, погіршується якість його внутрішньої поверхні.

Але цей інструмент має меншу металоємність, ніж трикутник Рьоло або сочевиця. Його головна перевага – можливість застосування одразу на двох сателітах планетарного пристрою для ротаційної роздачі [5]. Оскільки в цьому випадку для роздачі розтрубу зі стороною $2A$ виконується нерівність $r_o + k < A$, то інструменти не будуть заважати один одному при деформуванні труби. Симетричні відносно центру O силові дії інструменту на розтруб усувають радіальні навантаження на трубу та пристосування для її затиску і, тим самим, суттєво збільшують точність розмірів розтрубу.

Висновки. Для ротаційної роздачі квадратних розтрубів на циліндричних трубах запропонований новий інструмент, який в поперечному перерізі має контур у формі краплі, що падає. Наведені розрахунки розмірів цього контуру та співвідношення між ними, а також відстанню між двома центрами обертання інструменту та розмірами квадратного розтрубу. Надані коефіцієнти апроксимації розрахунків контуру інструменту в поперечному перерізі суперформулою Йохана Геліса.

Список літератури

1. Анищенко А.С., Андрущенко А.П. Ротационная раздача квадратных раструбов на цилиндрических трубах. *Судостроительная промышленность. Серия: Материаловедение*. Л.: ЦНИИКМ «Прометей». 1990. Вып. 13. С. 46–50.
2. А.с. 1426676. СССР. МПК В21D41/02. Способ ротационной раздачи квадратных раструбов на цилиндрических трубах. / Анищенко А.С. [и др.]. – Опубл. 30.09.1988, Бюл. №36. – 8 с.
3. Gielis J., Beirinckx B., Bastiaens E. Superquadrics with Rational and Irrational Symmetry. *Published 2003 in symposium on Solid Modeling and Application*. P. 262–265.
4. Анищенко А.С., Андрущенко А.П. Ротационная раздача граничных раструбов на трубчатых заготовках. *Вестник машиностроения*. 1991. №5. – С.54–55.
5. А.с. 1375383. СССР. МПК В21D41/02. Способ развальцовки трубчатых заготовок и устройство для его осуществления. / Анищенко А.С. [и др.]. – Опубл. 23.02.1988, Бюл. №7. – 8 с.
6. А.с. 1516191. СССР. МПК В21D41/02. Устройство для развальцовки трубчатых заготовок. / Анищенко А.С. [и др.]. – Опубл. 23.10.1989, Бюл. №39. – 7 с.
7. Анищенко А.С., Ткачев Р.О. Совершенствование ротационной раздачи граничных раструбов на трубчатых заготовках. *Защит металлургийних машин від поломок: Міжвуз. зб. наук. пр.* Маріуполь: 2011. №13. С. 210–215.
8. Пат. України на корисну модель №125924. МПК В21D41/02. Пристрій для ротаційної роздачі розтрубів./ Аніщенко О.С., Кухар В.В., Присяжний А.Г.– Опубл. 25.05.2018, Бюл. №10.– 5 с.
9. https://uk.wikipedia.org/wiki/Трикутник_Рело.

References (transliterated)

1. Anishchenko A.S., Andriushchenko A.P. Rotatsionnaya razdacha kvadratnykh rastrubov na tsilindricheskykh trubakh [The manufacture of square trumpet expansion method using rotary deformation]. Sudostroitel'naya promyshlennost. Seriya Materialovedenie. Leningrad. TsNIIKM "Prometey". 1990. Vyp. 13. – P. 46–50.
2. A.s. 1426676 SSSR. MPK B21D41/02. Sposob rotatsionnoy razzdachy kvadratnykh rastrubov na tsilindricheskykh trubakh [The method of rotational distribution of square trumpet on cylindrical tubes]. Anishchenko A.S. [i dr.]. Opubl. 30.09.1988. Bul. No36. – 8 p.
3. Gielis J., Beirinckx B., Bastiaens.E. Superquadrics with Rational and Irrational Symmetry. Published 2003 in symposium on Solid Modeling and Application. – P.262–265.
4. Anishchenko A.S., Andriushchenko A.P. Rotatsionnaya razdacha granenyykh rastrubov na trubchatykh zagotovkakh [Rotary distribution of faceted bells on tubular blanks]. Vestnyk mashinostroeniya. 1991. No5. – P. 54–55.
5. A.s. 1375383 SSSR. MPK B21D41/02. Sposob razval'tsovky trubchatykh zagotovok i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya [Method of flaring tubular blanks and device for its implementation]. Anishchenko A.S. [i dr.]. Opubl. 23.02.1988. Bul. No7. – 8 p.
6. A.s. 1516191 SSSR. MPK B21D41/02. Ustroystvo dlya razval'tsovky trubchatykh zagotovok [Device for expanding tubular blanks]. Anishchenko A.S. [i dr.]. Opubl. 23.10.1989. Bul. No39. – 7 p.
7. Anishchenko A.S., Tkachov R.O. Sovershenstvovanye rotatsionnoy razdachy granenyykh rastrubov na trubchatykh zagotovkakh [Improvement of the rotational distribution of faceted sockets on tubular blanks]. Zahyst metalurgichnykh mashyn vid polomok: Mizhvuz. zb. nauk. prats. Mariupol: 2011. No13. P. 210–215.
8. Patent Ukrainy na korysnu model No125924. MPK B21D41/02. Prystriy dlya rotatsionnoy rozdachy roztrubiv [Device for rotational distribution of bells]. Anishchenko A.S., Kukhar V.V., Pryisyazhnyi A.G. [i dr.]. Opubl. 25.05.2018. Bul. No10. – 5 p.
9. https://uk.wikipedia.org/wiki/Tryikutnyk_Relo [Triangle Reuleaux].

Надійшла (received) 06.05.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Аніщенко Олександр Сергійович (Анищенко Александр Сергеевич, Anishchenko Oleksandr Serhiiovych) – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Державний вищий науковий заклад «Приазовський державний технічний університет», доцент кафедри обробки металів тиском, Маріуполь, Україна, ORCID <https://orcid.org/0000-0002-1350-836X>, e-mail: aas540628@gmail.com

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

Присяжний Андрій Григорович (Присяжний Андрей Григорьевич, Pryisyazhnyi Andrii Hryhorovych) – кандидат технічних наук, Державний вищий науковий заклад «Приазовський державний технічний університет», доцент кафедри обробки металів тиском, Маріуполь, Україна, ORCID <https://orcid.org/0000-0001-8062-075X>, e-mail: agr87514@gmail.com

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

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

УДК 621.7.043

*Р. Г. АРГАТ, Р. Г. ПУЗИР, С. М. ЛЕЛЮХ, О. О. ПЕДУН***ТЕОРЕТИЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ СПОСОБУ ВИТЯГУВАННЯ БЕЗ ПРИТИСКАННЯ ФЛАНЦЯ З КАНТУВАННЯМ ЗАГОТОВКИ ДНИЩА РЕСИВЕРА АВТОМОБІЛЯ**

Розглядається теоретичний підхід для визначення можливостей формоутворення витягуванням циліндричних деталей автомобілів та іншої техніки без притискання фланця заготовки. При цьому, утворення гофрів і їх подальше розпрямлення, пропонується використовувати для забезпечення необхідного ступеня деформації. Наводяться різні приклади позитивного використання втрати стійкості фланця заготовки для виготовлення циліндричних деталей, а також способи усунення утворення гофрів під час витягування без притискного кільця. Показано, що при знакозмінній деформації спостерігається менша, ніж при монотонній деформації, інтенсивність накопичення пошкоджень металу, тому ступінь деформації до руйнування під час знакозмінного навантаження більше пластичності металу, визначеної під час скручування зразків в одному напрямку. Витягування без притискання фланця заготовки викликає виникнення гофрів, а після її кантування і подальшому навантаженні вони розпрямляються і механічні характеристики металу відновлюються. Але відновлення початкових характеристик металу, наприклад, межі плинності, відбувається після деформації зворотного знаку більшого за модулем, ніж попередня її деформація. Величина приросту реверсивної деформації залежить від ставлення початкового межі плинності до межі плинності при певній деформації і величини параметра Баушінгера. Тому, для кожного матеріалу цей показник буде неоднаковим. У свою чергу, розкрита закономірність дозволяє принципово пояснити можливість виготовлення напівфабрикатів пропонованим способом і попередньо оцінити кількість кантовок під час витягуванні циліндричної деталі. Отримано теоретичні залежності для розрахунку розмірів деталі від кількості кантувань, початкового діаметра заготовки і механічних характеристик металу, що враховують зв'язок між знакозмінними деформаціями. При цьому для опису пластичного стану деформованого металу використовується модель Г. Бакхауза, згідно з якою компоненти координат центру поверхні навантаження визначатимуться з урахуванням спадковості деформування.

Ключові слова: витягування, кантування, гофри, втрата стійкості, модель пластичності, деформація, притиск, заготовка.

*Р. Г. АРГАТ, Р. Г. ПУЗИРЬ, С. Н. ЛЕЛЮХ, А. А. ПЕДУН***ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ СПОСОБА ВЫТЯЖКИ БЕЗ ПРИЖИМА ФЛАНЦА С КАНТОВКОЙ ЗАГОТОВКИ ДНИЩА РЕСИВЕРА АВТОМОБИЛЯ**

Рассматривается теоретический подход для определения возможностей формообразования вытяжкой цилиндрических деталей автомобилей и другой техники без прижима фланца заготовки. При этом, образование гофров и их последующее распрямление, предлагается использовать для обеспечения необходимой степени деформации. Приводятся различные примеры положительного использования потери устойчивости фланца заготовки для изготовления цилиндрических деталей, а также способы устранения гофрообразования при вытяжке без прижимного кольца. Показано, что при знакопеременной деформации наблюдается меньшая, чем при монотонной деформации, интенсивность накопления повреждений металла, поэтому степень деформации до разрушения при знакопеременном нагружении больше пластичности металла, определенной при скручивании образцов в одном направлении. Вытяжка без прижима фланца заготовки вызывает возникновение гофров, а после ее кантовки и последующем нагружении они распрямляются и механические характеристики металла восстанавливаются. Но восстановление начальных характеристик металла, например, предела текучести, происходит после деформации обратного знака большей по модулю, чем предшествующая ей деформация. Величина приращения реверсивной деформации зависит от отношения начального предела текучести к пределу текучести при определенной деформации и величины параметра Баушингера. Поэтому, для каждого материала этот показатель будет неодинаковым. В свою очередь, раскрытая закономерность позволяет принципиально объяснить возможность изготовления полуфабрикатов предлагаемым способом и предварительно оценить количество кантовок при вытяжке цилиндрической детали. Получены теоретические зависимости для расчета размеров изготавливаемой детали от количества кантовок, начального диаметра заготовки и механических характеристик металла, учитывающие связь между знакопеременными деформациями. При этом для описания пластического состояния деформируемого металла используется модель Г. Бакхауза, согласно которой компоненты координат центра поверхности нагружения будут определяться с учетом наследственности деформирования.

Ключевые слова: вытяжка, кантовка, гофры, потеря устойчивости, модель пластичности, деформация, прижим, заготовка.

*R. G. ARHAT, R. G. PUZYR, S. N. LELUKH, O. O. PEDUN***THEORETICAL SUBSTANTIATION OF THE METHOD OF EXTRACTION WITHOUT CLIP HOLDER WITH CURTAIN PREPARATION OF THE BOTTOM OF THE RECEIVER OF THE CAR**

A theoretical approach is considered to determine the possibilities of forming by extracting cylindrical parts of automobiles and other equipment without pressing the workpiece flange. In this case, the formation of corrugations and their subsequent straightening is proposed to be used to provide the necessary degree of deformation. Various examples of the positive use of buckling flange stability for the manufacture of cylindrical parts, as well as ways to eliminate corrugation during drawing without a clamping ring are given. It was shown that with alternating deformation, a lesser rate of accumulation of metal damage is observed than with monotonic deformation, therefore, the degree of deformation to failure under alternating loading is greater than the ductility of the metal, determined by twisting the samples in one direction. Extraction without pressing the workpiece flange causes the appearance of corrugations, and after tilting and subsequent loading they straighten and the mechanical characteristics of the metal are restored. But the restoration of the initial characteristics of the metal, for example, the yield strength, occurs after the deformation of the opposite sign is greater in magnitude than the deformation preceding it. The magnitude of the increment of the reverse deformation depends on the ratio of the initial yield strength to the yield strength at a certain deformation and the value of the Bausinger parameter. Therefore, for each material this indicator will be uneven. In turn, the disclosed regularity allows us to fundamentally explain the possibility of manufacturing semi-finished products by the proposed method and to preliminarily estimate the number of grooves when extracting a cylindrical part. Theoretical dependences are obtained for calculating the dimensions of the manufactured part on the number of grooves, the initial diameter of the workpiece and the mechanical characteristics of the metal, taking into account the relationship between alternating deformations. In this case, the G. Bakhhaus model is used to describe the plastic state of the wrought metal, according to which the components of the coordinates of the center of the loading surface will be determined taking into account the heredity of the deformation.

Key words: hood, tilting, corrugations, loss of stability, plasticity model, deformation, clamp, blank.

© Р. Г. Аргат, Р. Г. Пузир, С. М. Лелюх, О. О. Педун 2019

Вступ. Розвиток машинобудівного виробництва ґрунтується на сучасних досягненнях науково-технічного прогресу у всіх галузях і напрямках, починаючи з матеріалознавства і закінчуючи досягненнями науки в економіці та маркетинзі. Важливу роль у цьому розвитку займають сучасні методи виготовлення деталей машин і механізмів методами обробки металів тиском, які містять у собі риси не тільки заготівельного виробництва, але і складального, й основного з виготовленням кінцевої продукції. Процеси листового штампування як виду обробки металів тиском у холодному стані є високоєфективними й економічними, за їх допомогою отримують кінцеві продукти високої якості з необхідним набором функціональних характеристик, розмірної точності та чистоти поверхні. Тобто вони відповідають вимогам, які висуваються на цьому етапі виробництва за енергоєфективністю, економією матеріалів і гнучкості.

Здатність листоштампувальних виробництв в найкоротший термін до перестроювання на випуск нової продукції без значних матеріальних витрат стимулює розвиток нових технологічних процесів листового штампування, здатних реалізувати цей перехід і інтенсифікувати увесь виробничий процес. Якість продукції, що випускається при цьому має бути конкурентоспроможною, а забезпечується це набором фізико-механічних характеристик матеріалу і способом виготовлення. При цьому важливу роль відіграють методи оцінки та попереднього прогнозування якості виробів і їх експлуатаційних характеристик. Розвиток цих теоретичних методів, розробка нових теоретично-експериментальних методів оцінки дозволить скоротити час на технічну підготовку виробництва під час переходу на випуск нової партії деталей, знизити витрату матеріалів, які використовуються в пробних переходах або у виготовленні експериментального оснащення, що забезпечить найкращі умови для швидкого переналагодження технологічних процесів.

Витягування без складкотримача зменшує металоємність оснащення і загалом спрощує процес. Але характеризується зменшеною висотою і коефіцієнтами витягування у порівнянні з однойменним способом деформування із застосуванням притиску. Прагнення інтенсифікувати штампування без притискання фланця заготовки призвело до створення великої кількості нових способів деформування і відповідного оснащення.

Мета роботи. Теоретично обґрунтувати можливість виготовлення циліндричних деталей витягуванням без застосування притиску фланця. Втрату стійкості у вигляді утворення гофрів використовувати для досягнення необхідного ступеня деформації.

Виклад основного матеріалу. Одним з основних способів листового штампування є витягування циліндричних деталей. Ці деталі як складальні одиниці та як окремі комплекси набули широкого поширення у всіх галузях машинобудування. Переважно розрізняють три способи витягування: витягування з

притисканням, витягування зі стоншенням стінок і витягування без притискання. Перші два способи застосовуються практично в усіх листоштампувальних цехах і спеціалізованих виробництвах, більшість ліній яких автоматизовані та розроблено науково обґрунтовані методики проектування технологічних процесів. Третій спосіб отримав менше поширення з огляду на його обмеженість та неспроможність за один перехід отримати значні ступені деформації, співмірні з деформаціями перших двох. Однак простота оснащення, обладнання, що застосовується, а також можливість швидкого переналагодження на випуск нових виробів зумовлює необхідність подальшого розвитку цього способу. Багаторічний досвід застосування в листоштампувальній виробництві процесу витягування, а також наукові та експериментальні дослідження в даній області дозволили розділити і класифікувати цей процес (рис. 1.) на класи і підкласи, що сприяло розширенню уявлень про природу напружено-деформованого стану в кожному підкласі.

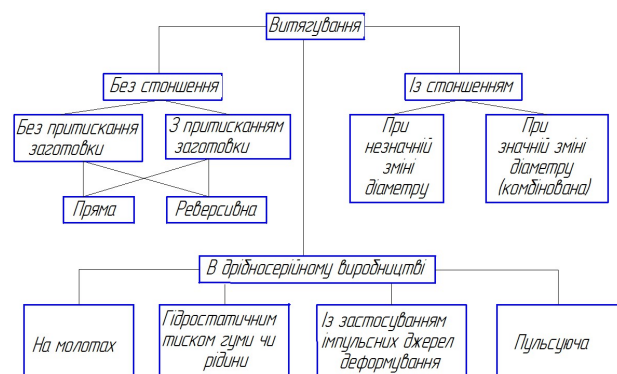


Рис. 1 – Класифікація процесу витягування

Механічні характеристики металу й умови деформування накладають певні обмеження на можливості граничного формоутворення. Практично всі операції листового штампування виконуються в умовах, близьких до плоского напруженого й об'ємного деформованого стану. Для них характерне місцеве стоншення стінки заготовки, що спричиняє утворення тріщини та руйнування або втрати стійкості у вигляді виникнення гофрів і складок. Застосування нових теоретичних підходів до розрахунку напружено-деформованого стану ділянок заготовки в осередку пластичної деформації в процесах листового штампування дозволить виявити формально підтверджені та раніше невиявлені чинники процесу та їх комбінації, які мають вирішальний вплив на виникнення браку. Залучення до аналітичного розрахунку більшої кількості граничних умов уточнить наявні залежності, розширить їх застосування на суміжні процеси листового штампування, що дозволить направлено впливати на поле напружень і деформацій з метою забезпечення розмірної якості виробів і набору функціональних властивостей.

З огляду на це значний науковий і практичний інтерес представляють розробка та дослідження технологічних процесів, заснованих на штампуванні без притискання, створення як нових, так і комбінованих способів. Тому розробка науково обґрунтованих методів розрахунку цих процесів є актуальним, значним науково-технічним завданням, упровадження якого робить істотний внесок у справу прискорення науково-технічного процесу в обробці металів тиском.

Витягування без складкотримача зменшує металоємність оснащення і загалом спрощує процес. Але характеризується зменшеною висотою і коефіцієнтами витягування у порівнянні з однойменним способом деформування із застосуванням притиску. Прагнення інтенсифікувати штампування без притискання фланця заготовки призвело до створення великої кількості нових способів деформування і відповідного оснащення. Теоретично обґрунтувати можливість виготовлення циліндричних деталей витягуванням без застосування притиску фланця. Втрату стійкості у вигляді утворення гофрів використовувати для досягнення необхідного ступеня деформації.

Для розширення можливостей витягування без притискання застосовують попередньо спрофільовану заготовку, заготовку у вигляді багатокутника з накатаними стоншеннями у вигляді циліндричних жолобів [1, 2]; витягування з технологічними накладками і контейнерне штампування [3, 4]. Також для збільшення глибини витягування деталі застосовують природне утворення гофрів у фланцевій частині з подальшим їх розгладженням [5–7, 8]. Змінюють геометрію матриці, наприклад, застосовують спрофільовану матрицю, з конічною західною частиною, а також з евольвентою поверхні з кільцевими канавками у вигляді ступенів [9, 10]. Однак ці методи ускладнюють виготовлення оснащення, або вимагають додаткових технологічних операцій перед витягуванням. Це не завжди економічно обґрунтовано, особливо в умовах дрібносерійного і одиничного виробництва.

Сутність запропонованого способу полягає у витягуванні круглої заготовки до певної глибини з утворенням складок на фланцевій частині. Потім кантування заготовки на 180° , установка співвісна пуансону і матриці і деформування напівфабрикату в зворотному напрямку з «вивертанням» до розгладження складок і подальшого їх утворення. Потім знову кантування заготовки і повторне деформування. Таким чином, виконавши кілька кантувань можна отримати готовий виріб необхідного діаметра і висоти. Для його виготовлення в звичайних умовах витягування необхідно застосовувати притиск і проводити кілька витяжних переходів. Та обставина, що з кожним поворотом заготовки на 180° і навантаженні, висота циліндричного напівфабрикату збільшується, показано за допомогою моделі матеріалу з ізотропним зміцненням [11].

При цьому для опису пластичного стану деформованого металу використовується модель

Г. Бакхауза, згідно з якою компоненти координат центру поверхні навантаження визначатимуться за формулою [12]:

$$\alpha_{ij} = \frac{1 - \beta(e)}{3} \sigma_0(e) \frac{d\varepsilon_{ij}}{e} - \frac{1}{3} \int_0^e [1 - \beta(e^*)] \sigma_0(e^*) \phi(e - e^*) \frac{d^2\varepsilon_{ij}}{de^{*2}} de^*, \quad (1)$$

де $\sigma_0(e)$ – інтенсивність напруження, що є функцією накопиченої деформації e ;

$de = \sqrt{2de_{ij}de_{ij}}/3de$ – приріст накопиченої

деформації;

$d\varepsilon_{ij}$ – компоненти збільшень пластичних

деформацій;

e^* – змінна інтегрування;

$\beta(e)$ – параметр, що характеризує ефект

Баушінгера;

$\phi(e - e^*)$ – спадкова функція (або функція «пам'яті» матеріалу), що відображає властивості металу запам'ятовувати історію попереднього навантаження.

Ця модель вважає незалежність функцій $\sigma_0(e)$, $\beta(e)$, $\phi(e)$ від виду напруженого стану і історії навантаження і вони розглядаються як використовувати в моделі властивості матеріалу.

Якщо в процесі пластичного деформування координата центру поверхні навантаження буде дорівнювати $\alpha_{ij} = 0$, то матеріал має ізотропне зміцнення.

На підставі рівняння $\alpha_{ij} = 0$, з урахуванням аналізу деформованого стану отримано рівняння для визначення деформації ε_2 , при якій матеріал знову стає ізотропним за механічними властивостями, наприклад, по умовній межі плинності [11]

$$[1 - \beta(\varepsilon_2)] \sigma_0(\varepsilon_2) = [1 - \beta(\varepsilon_1)] \sigma_0(\varepsilon_1) \phi(\varepsilon_2 - \varepsilon_1). \quad (2)$$

Отже, використовуючи цей зв'язок між знакомінними деформаціями, встановлюється залежність розмірів деталі від кількості кантувань, початкового діаметра заготовки і механічних властивостей металу.

З аналізу співвідношення (2) встановлено, що під час попередніх деформацій має місце залежність $\varepsilon_2 = \varepsilon_1(f)$, яка представляється лінійною функцією:

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_1 + \Delta\varepsilon, \quad (3)$$

де $\Delta\varepsilon$ – приріст накопиченої деформації під час зворотного деформування, що забезпечує ефект ізотропного зміцнення.

У розгорнутому вигляді вираз (3) можна записати:

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_1 + \frac{[1 - \beta(\varepsilon_2)]\sigma_0(\varepsilon_2)}{[1 - \beta(\varepsilon_1)]\sigma_0(\varepsilon_1)}. \quad (4)$$

Обговорення результатів. Зробимо розрахунок для заготовки з такими розмірами: $D_0=100$ мм; $s=1,5$ мм. Необхідно отримати деталь $D=50$ мм. Перевіряємо умови витягування за Романовським С. П.:

$$\frac{s}{D}100 \leq 4,5(1 - m_1) - \frac{1,5}{100}100 \leq 4,5\left(1 - \frac{50}{100}\right) \rightarrow 1,5 \leq 2,25,$$

тобто витягування необхідно проводити з притисканням фланця. Висота деталі під час цього буде дорівнювати:

$$h = 0,25\left(\frac{D_0}{m} - d\right) = 0,25\left(\frac{100}{0,5} - 50\right) = 37,5 \text{ мм.}$$

Співвідношення (4) дає можливість визначити деформацію, яку необхідно надати заготовці після кантування її на 180° , щоб отримати ізотропію механічних властивостей (наприклад, відновлення межі плинності) для недеформованої заготовки. Це в свою чергу дасть можливість надати заготовці, яка повернута на 180° , велику деформацію зворотного знаку, а в цілому після декількох поворотів отримати деталь заданої висоти.

Зусилля витягування різко зростає після того як метал заготовки охопить витяжну кромку матриці і радіус заокруглення пуансона. Припустимо $r_m=5$ мм і $r_p=5$ мм – радіуси матриці і пуансона відповідно. Тоді висота напівфабрикату після першого етапу витягування буде дорівнювати $h_1=10$ мм. Логарифмічну деформацію визначимо не по діаметрам заготовки і готової деталі, а по висоті напівфабрикату – $\varepsilon_1 = \ln \frac{h_k - h_1}{h_k} = \ln \frac{37,5 - 10}{37,5} = 0,31$. Знаходимо межу плинності для сталі 08 кп по ступеневій залежності [13]

$$\sigma_s = \sigma_{s0} + A\varepsilon^n = \sigma_{s0} + 3,4\varepsilon^{0,6}.$$

Далі, з [14] відомий коефіцієнт Баушінгера для сталі 08 кп. Після періоду насичення він складе – $\beta(\varepsilon_1) = 0,7$. Знаходимо межу плинності при деформації зворотного знаку – $\sigma_s = \sigma_{s0} + A\varepsilon^n = (\sigma_{s0} + 3,4\varepsilon_1^{0,6})\beta(\varepsilon_1)$, де σ_{s0} – вихідна межа плинності, з довідкових даних [13] $\sigma_{s0} = 23$ кг/мм². Далі оцінюємо коефіцієнт Баушінгера під час деформації зворотного знаку ε_2 – $\beta(\varepsilon_2) = \frac{(\sigma_{s0} + 3,4\varepsilon_1^{0,6})\beta(\varepsilon_1)}{\sigma_{s0}}$. Підставляємо знайдене в вираз (4) і після деяких перетворень матимемо:

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_1 + \frac{\left(1 - \frac{(\sigma_{s0} + 3,4\varepsilon_1^{0,6})\beta(\varepsilon_1)}{\sigma_{s0}}\right)\sigma_{s0}}{2(1 - \beta(\varepsilon_1))(\sigma_{s0} + 3,4\varepsilon_1^{0,6})\beta(\varepsilon_1)}. \quad (5)$$

Для заданих умов деформування матимемо:

$$\varepsilon_2 = 0,31 + \frac{\left(1 - \frac{(23 + 3,4 \cdot 31^{0,6}) \cdot 0,7}{23}\right)23}{2 \cdot (1 - 0,7)(23 + 3,4 \cdot 31^{0,6}) \cdot 0,2} = 0,43. \quad (6)$$

Цей результат дозволяє знайти висоту напівфабрикату після кантування заготовки на 180° і зворотній деформації, коли межа плинності буде приблизно дорівнювати початковій $h_2 = 13,8$ мм і $\Delta h = 3,8$ мм. Отже, необхідна кількість кантувань складе: $\frac{37,5 - 10}{3,8} \approx 8$.

При знакомінній деформації спостерігається менша, ніж для монотонної деформації, інтенсивність накопичення пошкоджень металу, тому ступінь деформації до руйнування під час знакомінного навантаження більше пластичності металу, що визначено під час скручування зразків в одному напрямку [14].

Висновки. З наведених теоретичних міркувань і наданих розрахунків виходить, що витягування без притискання фланця заготовки викликає виникнення гофрів, а після її кантування і подальшому навантаженні вони розпрямляються і механічні характеристики металу відновлюються. Але відновлення початкових характеристик металу, наприклад, межі плинності, відбувається після деформації зворотного знаку більшим за модулем, ніж попередня її деформація. Величина приросту реверсивної деформації залежить від співвідношення початкової межі плинності до межі плинності при певній деформації і величини параметра Баушінгера. Тому, для кожного матеріалу цей показник буде неоднаковим. У свою чергу, розкрита закономірність дозволяє принципово пояснити можливість виготовлення напівфабрикатів пропонованим способом і попередньо оцінити кількість кантувань під час витягування циліндричної деталі.

Список літератури

1. Коротков В. А., Яковлев С. С. Пат. 2056199, Российская Федерация. *Заготовка для вытяжки цилиндрического полуфабриката*. 1996.
2. Рапопорт С. И., Коваленко В. М., Рапопорт Л. Е., Белоноин Г. В., Кондратьев Б. В. Пат. 1542665, СССР. *Заготовка для вытяжки*. 1990.
3. Иванов В. Л. Пат. 2148460, Российская Федерация. *Способ вытяжки деталей из тонколистовых заготовок*. 2000.
4. Сизов Е. С., Бабуринов М. А., Елкин В. К., Богуславский Б. З., Алавердов В. Р., Елисеев О. В. Пат. 2118219, Российская Федерация. *Способ штамповки-вытяжки изделий из листового металла*. 1998.
5. Сизов Е. С. Пат. 2023523, Российская Федерация. *Способ вытяжки полых изделий из листового металла*. 1994.

6. Петряшин В. И, Нагаев Ю. К, Долженков Б. С, Мыка В. В. Пат. 1751913, Российская Федерация. *Устройство для вытяжки листовых изделий*. 1995.
7. Дорохин С. А. Пат. 1733163, СССР. *Устройство для глубокой вытяжки*. 1992.
8. Поздов И. Н., Поздов К. И. Пат. 2217257, Российская Федерация. *Способ вытяжки полей изделий из листовых заготовок*. 2003.
9. Романовский В. П. *Справочник по холодной штамповке*. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1979. 520 с.
10. Калужный О. В. Зменшення кількості переходів витягування вісесиметричних виробів з використанням матриці спеціального профілю. *Обработка материалов давлением: сборник научных трудов*. Краматорск: ДГМА, 2013. № 4 (37). С. 93–96.
11. Хван А. Д., Евдокимова Н. А. Изотропное упрочнение материалов реверсивным кручением. *Обработка материалов давлением*. Краматорск: ДГМА, 2009. № 1 (20). С. 36–40.
12. Бакхауз Г. Анизотропия упрочнения. Теория в сопоставлении с экспериментом. *Изв. АН СССР. Механика твердого тела*. 1976. № 6. С. 12–129.
13. Третьяков А. В., Трофимов Г. К., Гурьянова М. К. *Механические свойства сталей и сплавов при пластическом деформировании*. Москва: Машиностроение, 1971. 63 с.
14. Багатов А. А. *Механические свойства и модели разрушения металлов: учебное пособие для вузов*. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2002. 329 с.
15. Мовшович И. Я., Пузырь Р. Г. Расчет меридиональных напряжений на первой операции процесса радиально-ротационного профилирования ободьев колес. *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*. 2013. № 10. С. 3–7.
16. Savelov D., Dragobetsky V., Puzyr R., Markevych A. Peculiarities of vibrational press dynamics with hard-elastic restraints in the working regime of metal powders molding. *Metallurgical and Mining Industry*. 2015, No. 2, pp. 67–75.
17. Puzyr R., Haikova T., Majernik J., Karkova M., Kmec J. Experimental Study of the Process of Radial Rotation Profiling of Wheel Rims Resulting in Formation and Technological Flattening of the Corrugations. *Manufacturing Technology*. 2018, No. 18 (1), pp. 106–111.
18. Пузырь Р. Г., Троцко О. В., Черкашенко В. Ю. Влияние геометрических параметров цилиндрической заготовки на напряженно-деформированное состояние при раздате коническими пуансонами. *Обработка материалов давлением: сборник научных трудов*. Краматорск: ДГМА, 2012. № 4 (33). С. 114–121.
19. Мосьпан Д. В., Драгобецкий В. В., Пузырь Р. Г. Определение потребного крутящего момента при радиально-ротационном профилировании ободьев колес. *Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського*. Кременчук: КДПУ, 2008. Вип. 6 (53), частина 2. С. 64–66.
20. Maslov A., Batsaikhan J., Puzyr R., Salenko Y. The determination of the parameters of a vibration machine for the internal compaction of concrete mixtures. *International Journal of Engineering & Technology*. 2018, Vol. 7, No. 4.3, pp. 12–19.
21. Puzyr R., Kukhar V., Maslov A., Shchipkovskiy Y. The Development of the Method for the Calculation of the Shaping Force in the Production of Vehicle Wheel Rims. *International Journal of Engineering & Technology*. 2018, Vol. 7, No. 4.3, pp. 30–34.
22. Драгобецкий В. В., Левченко Р. В., Пузырь Р. Г. Анализ нагружения заготовки при радиально-ротационном способе получения ободьев колес с измененной схемой внешнего воздействия. *Обработка материалов давлением*. Краматорск: ДГМА, 2012. № 1 (30). С. 146–149.
23. Аргат Р. Г., Пузырь Р. Г., Долгих О. Н. Оценка приемов, увеличивающих степень деформации при вытяжке цилиндрических деталей без складкодержателя. *Вісник Нац. техн. ун-ту "ХПИ": зб. наук. пр. Сер.: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії*. Харків: НТУ «ХПИ», 2017. № 36 (1258). С. 5–9.
24. Аргат Р. Г., Пузырь Р. Г. Определение геометрических параметров листовой заготовки для вытяжки осесимметричных деталей, устраняющих потерю устойчивости фланца. *Обработка материалов давлением: сборник научных трудов*. Краматорск: ДГМА, 2013. № 2 (35). С. 118–123.
25. Пузырь Р. Г. Определение поверхностной нагрузки, вызывающей пластическую деформацию цилиндрической заготовки. *Обработка материалов давлением: сборник научных трудов*. Краматорск: ДГМА, 2013. № 2 (35). С. 99–105.
26. Аргат Р. Г., Пузырь Р. Г., Вакуленко Р. А. Вплив анізотропії і зміцнення металу на втрату стійкості фланця при витягуванні циліндричної деталі без складкоутримувача. *Вісник Нац. техн. ун-ту "ХПИ": зб. наук. пр. Сер.: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії*. Харків: НТУ «ХПИ», 2018. № 31 (1307). С. 3–7.
27. Arhat R., Puzyr R., Haikova T. & Markevych A. Theoretical investigations of the stressed state on the exchange rate of matrix at highly cylinder parts. *Physical & chemical geotechnologies*. Дніпро: НТУ «ДП», 2018, pp. 137–139.
28. Аргат Р. Г., Пузырь Р. Г., Долгих О. Н., Гриценко Б. С. Учет влияния упрочнения на поле напряжений при профилировании и вытяжке листового металла. *Вісник Нац. техн. ун-ту "ХПИ": зб. наук. пр. Сер.: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії*. Харків: НТУ «ХПИ», 2017. № 7 (1229). С. 5–9.

References (transliterated)

1. Korotkov V. A., Yakovlev S. S. *Zagotovka dlya vytyazhki tsilindricheskogo polufabrikata* [Blank for the extraction of a cylindrical semi-finished product]. Patent RF, no. 205619, 1996.
2. Rapoport S. I., Kovalenko V. M., Rapoport L. Ye., Belomoin G. V., Kondrat'yev B. V. *Zagotovka dlya vytyazhki* [Blank for hoods]. Patent USSR, no. 1542665, 1990.
3. Ivanov V. L. *Sposob vytyazhki detaley iz tonkolistovykh zagotovok* [The method of extracting parts from sheet blanks]. Patent RF, no. 2148460, 2000.
4. Sizov Ye. S., Baburin M. A., Yelkin V. K., Boguslavskiy B. Z., Alaverdov V. R., Yeliseyev O. V. *Sposob shtampovki-vytyazhki izdeliy iz listovogo metalla* [The method of stamping-drawing products from sheet metal]. Patent RF, no. 2118219, 1998.
5. Sizov Ye. S. *Sposob vytyazhki polykh izdeliy iz listovogo metalla* [A method of extracting hollow sheet metal products]. Patent RF, no. 2023523, 1994.
6. Petryashin V. I., Nagayev YU. K., Dolzhenkov B. S., Myka V. V. *Ustroystvo dlya vytyazhki listovykh izdeliy* [Device for drawing sheet products]. Patent RF, no. 1751913, 1995.
7. Dorokhin S. A. *Ustroystvo dlya glubokoy vytyazhki* [Device for deep drawing]. Patent USSR, no. 1733163, 1992.
8. Pozdov I. N., Pozdov K. I. *Sposob vytyazhki polykh izdeliy iz listovykh zagotovok* [The method of extracting hollow products from sheet blanks]. Patent RF, no. 2217257, 2003.
9. Romanovsky V. P. *Spravochnik po kholodnoy shtampovke* [Cold stamping guide]. L.: Mechanical engineering, 1979, 520 p.
10. Kalyughnyi V. L. Zmenshennya kil'kosti perekhodiv vytyahuvannya visesyetrychnykh vyrobiv z vykorystanniam matrytsi spetsial'nogo profilyu [Reducing the number of transitions of the extraction of axisymmetric products using a special profile matrix]. *Obrabotka materialov davleniyem: sbornik nauchnykh trudov* [Processing of materials pressure: collection of scientific works]. Kramatorsk: DGMA, 2013, No. 4 (37), pp. 93–96.
11. Khvan A. D., Yevdokimova N. A. Izotropnoye uprochneniye materialov reversivnym krucheniyem [Isotropic hardening of materials by reverse torsion]. *Obrabotka materialov davleniyem* [Processing of materials pressure]. Kramatorsk: DGMA, 2009, No. 1 (20), pp. 36–40.
12. Bakkhauz G. Anizotropiya uprochneniya. Teoriya v sopostavlenii s eksperimentom [Anisotropy of hardening. Theory versus experiment]. *Izv. USSR Academy of Sciences. Solid mechanics*. 1976. No. 6. pp. 12–129.
13. Tret'yakov A. V., Trofimov G. K., Gur'yanova M. K. *Mekhanicheskiye svoystva staley i splavov pri plasticheskom deformirovani* [Mechanical properties of steels and alloys during plastic deformation]. Moscow: Mechanical engineering, 1971. 63 p.
14. Bagatov A. A. *Mekhanicheskiye svoystva i modeli razrusheniya metallov: uchebnoye posobiye dlya vuzov* [Mechanical properties and models of metal destruction: a textbook for universities]. Yekaterinburg: GOU VPO USTU-UPI, 2002. 332 p.
15. Movshovich, I. Ja., Puzyr, R. G. Raschet meridional'nyh naprjazhenij na pervoj operacii processa radial'no-rotacionnogo profilirovaniya obod'ev koles [Calculation of meridional stresses on the first operation of the process of radial-rotary profiling of wheel rims].

- Kuznechnoshtampovochnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem* [Forging and stamping production. Pressure treatment]. 2013, No. 10, pp. 3–7.
16. Savelov D., Dragobetsky V., Puzyr R., Markevych A. Peculiarities of vibrational press dynamics with hard-elastic restraints in the working regime of metal powders molding. *Metallurgical and Mining Industry*. 2015, No. 2, pp. 67–75.
 17. Puzyr R., Haikova T., Majernik J., Karkova M., Kmec J. Experimental Study of the Process of Radial Rotation Profiling of Wheel Rims Resulting in Formation and Technological Flattening of the Corrugations. *Manufacturing Technology*. 2018, No. 18 (1), pp. 106–111.
 18. Puzyr R. G., Trotsko O. V., Cherkashchenko V. Y. Vliyanie geometricheskikh parametrov tsilindricheskoy zagotovki na napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie pri razdache konicheskimi puansonami [Influence of geometrical parameters of cylindrical preparation on the intense deformed state at distribution by conic punches]. *Obrabotka materialov davleniyem: sbornik nauchnykh trudov* [Processing of materials pressure: collection of scientific works]. Kramatorsk: DGMA, 2012, No. 4 (33), pp. 114–121.
 19. Mos'pan D. V., Dragobetskiy V. V., Puzyr R. G. Opredelenie potrebnogo krutjashhego momenta pri radial'no-rotatsionnom profilirovani obod'ev koles [Determination of the required torque at radial-rotational profiling of wheel rims]. *Visnik Kremenchuc'kogo derzhavnogo politehnicnogo universitetu imeni Mihajla Ostrograds'kogo* [Bulletin of the Kremenchug State Polytechnic University named after Mikhail Ostrogradsky]. Kremenchuk: KDFU, № 6.53, 2008, part 2, pp. 64–66.
 20. Maslov A., Batsaikhan J., Puzyr R., Salenko Y. The determination of the parameters of a vibration machine of the internal compaction of concrete mixtures. *International Journal of Engineering & Technology*. 2018, Vol. 7, No. 4.3, pp. 12-19.
 21. Puzyr R., Kukhar V., Maslov A., Shchipkovskiy Y. The Development of the Method for the Calculation of the Shaping Force in the Production of Vehicle Wheel Rims. *International Journal of Engineering & Technology*. 2018, Vol. 7, No. 4.3, pp. 30–34.
 22. Dragobetskiy V. V., Levchenko R. V., Puzyr' R. G. Analiz nagruzhennykh konstruksiy pri radial'no-rotatsionnom sposobe polucheniya obod'ev koles s izmenennoy skhemoy vneshnego vozdeystviya [Analysis of loaded structures with a radial-rotational method for producing wheel rims with a modified external exposure pattern]. *Obrabotka materialov davleniyem* [Processing of materials pressure]. Kramatorsk: DGMA, 2012, No. 1 (30), pp. 146–149.
 23. Arhat R. G., Puzyr R. G., Dolgih O. N. Otsenka priyemov, uvelichivayushchikh stepen' deformatsii pri vytyazhke tsilindricheskikh detaley bez skladkoderzhatelya [Evaluation of techniques that increase the degree of deformation in the extraction of cylindrical parts without a storage holder]. *Visnyk Nats. tekhn. un-tu "KHPI": zb. nauk. pr. Ser.: Innovatsiyini tekhnolohiyi ta obladnannya obrobky materialiv u mashynobuduvanni ta metalurhiyi* [Bulletin of NTU "KhPI". Series: Innovative technologies and equipment of materials processing in engineering and metallurgy]. Kharkiv, NTU "KhPI", 2017, No. 36(1258), pp. 5–9.
 24. Arhat R. G., Puzyr R. G. Opredeleniye geometricheskikh parametrov listovoy zagotovki dlya vytyazhki osesimmetrichnykh detaley, ustranyayushchikh poteryu ustoychivosti flantsa [Determination of the geometrical parameters of the sheet blank for drawing axisymmetric parts that eliminate the loss of stability of the flange]. *Obrabotka materialov davleniyem: sbornik nauchnykh trudov* [Processing of materials pressure: collection of scientific works]. Kramatorsk: DGMA, 2013, No. 2 (35), pp. 118–123.
 25. Puzyr' R.G. Opredeleniye poverkhnostnoy nagruzki, vyzvyvayushchey plasticheskuyu deformatsiyu tsilindricheskoy zagotovki [Determination of the surface load causing plastic deformation of the cylindrical workpiece]. *Obrabotka materialov davleniyem: sbornik nauchnykh trudov* [Processing of materials pressure: collection of scientific works]. Kramatorsk: DGMA, 2013, No. 2 (35), pp. 99–105.
 26. Arhat R. H., Puzyr R. H., Vakulenko R. A. Vplyv anizotropiyi i zmitsnennyya metalu na vtratu stiykosti flantsya pry vytyahuvanni tsylindrychnoyi detali bez skladkoutrymuvacha [Innovative technologies and equipment for materials processing in mechanical engineering and metallurgy]. *Visnyk Nats. tekhn. un-tu "KHPI": zb. nauk. pr. Ser.: Innovatsiyini tekhnolohiyi ta obladnannya obrobky materialiv u mashynobuduvanni ta metalurhiyi* [Bulletin of NTU "KhPI". Series: Innovative technologies and equipment of materials processing in engineering and metallurgy]. Kharkiv, NTU "KhPI", 2018, No. 31 (1307), pp. 3–7.
 27. Arhat R., Puzyr R., Haikova T. & Markevych A. Theoretical investigations of the stressed state on the exchange rate of matrix at highly cylinder parts. *Physical & chemical geotechnologies*. Дніпро: НТУ «ДІП», 2018, pp. 137–139.
 28. Arhat R. G., Puzyr R. G., Dolgih O. N., Gritsenko B. S. Uchet vliyaniya uprochneniya na pole napryazheniy pri profilirovani i vytyazhke listovogo metalla [Accounting for the effect of hardening on the stress field during profiling and drawing of sheet metal]. *Visnyk Nats. tekhn. un-tu "KHPI": zb. nauk. pr. Ser.: Innovatsiyini tekhnolohiyi ta obladnannya obrobky materialiv u mashynobuduvanni ta metalurhiyi* [Bulletin of NTU "KhPI". Series: Innovative technologies and equipment of materials processing in engineering and metallurgy]. Kharkiv, NTU "KhPI", 2017, No. 7 (1229), pp. 5–9.

Надійшла (received) 25.10.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

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

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

Лелюх Сергій Миколайович (Лелюх Сергей Николаевич, Lelukh Serhiy) – аспірант, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, старший викладач кафедри технологія машинобудування; м. Кременчук, Україна.

Педун Олександр Олександрович (Педун Александр Александрович, Pedun Oleksandr) – аспірант, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, старший викладач кафедри технологія машинобудування; м. Кременчук, Україна.

УДК 331.45 (477)

В. В. БЕРЕЗУЦЬКИЙ, О. І. ІЛЬНЬСЬКА**ЕРГОНОМІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ УМОВ ПРАЦІ В ОФІСАХ**

Розглянуті питання ергономічного забезпечення робочих місць у виробничих приміщеннях, у яких розміщуються працівники та керівний склад підприємств та установ. Ергономічні питання розглянуто стосовно важливої та актуальної складової психофізіологічних особливостей умов праці, які останній час мають дуже суттєвий вплив на показники праці та здоров'я працюючих. Наведено, що питання ергономіки у теперішній час, слід розглядати разом із питаннями культури виробництва та її складової – культури безпеки. Систему «людина – машина – оточуюче середовище» розглянуто виходячи із того, що основною ланкою у цій системі є людина, який притаманні коливання психологічного настрою, який пов'язано із показниками фізичного, емоціонального, інтелектуального та інтуїтивного біоритмів кожного працівника. У сучасному техногенному середовищі ці показники мають суттєвий вплив на працездатність людини та безпеку праці. Сучасні підходи до вирішення ергономічних питань необхідно розглядати із використанням ризик-орієнтованого підходу, а саме, застосуванням карт-ризиків, визначенням (ідентифікації) небезпек, які повинні враховувати і ризики, які виникають у спілкуванні людей між собою, вплив на персонал керівників та зворотній вплив, характер та форму передачі інформації тощо. Багато людей змінюють роботу тому що психологічний клімат у офісі не відповідає їх психологічному настрою. Розглянуті варіанти вирішення питань ергономічних особливостей організації праці, у контексті визначення та регулювання психофізіологічних відношень у колективі, є важливою задачею, яку необхідно вирішувати сучасним керівникам.

Пропонується застосування новітньої методики по оцінці ризиків умов праці робочих місць для визначення психофізіологічних особливостей роботи працівників, що працюють в офісах типу «open space» з метою покращення умов праці, підвищення задоволеності працівників роботою і як наслідок підвищення ефективності праці. Зроблено висновки про можливість застосування даної методики, проведено ідентифікацію ризиків та оцінено ризики на робочих місцях працівників офісів типу «Open space», надано рекомендації щодо поліпшення умов праці на одному з підприємств міста Харків.

Ключові слова: ергономіка, умови праці, офіс типу «Open space», анкетування, психофізіологічні особливості, ризик орієнтований підхід, оцінка ризику.

В. В. БЕРЕЗУЦЬКИЙ, О. И. ИЛЬИНСКАЯ**ЕРГОНОМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ УСЛОВИЙ ТРУДА В ОФИСАХ**

Рассмотрены вопросы эргономического обеспечения рабочих мест в производственных помещениях, в которых размещаются работники и руководящий состав предприятий и учреждений. Эргономические вопросы рассмотрены относительно важной и актуальной составляющей психофизиологических особенностей условий труда, которые последнее время имеют очень существенное влияние на показатели труда и здоровья работающих. Показано, что вопрос эргономики в настоящее время, следует рассматривать вместе с вопросами культуры производства и ее составляющей – культуры безопасности. Систему «человек – машина – окружающая среда» рассмотрено исходя из того, что основным звеном в этой системе есть человек, которому присущи колебания психологического настроения, который связан с показателями физического, эмоционального, интеллектуального и интуитивного биоритмов каждого работника. В современной техногенной среде эти показатели имеют существенное влияние на работоспособность человека и безопасность труда. Современные подходы к решению эргономических вопросов необходимо рассматривать с использованием риск-ориентированного подхода, а именно, применением карт-рисков, определению (идентификации) опасностей, которые должны учитывать и риски, которые возникают при общении людей между собой, влияние на персонал руководителей и обратное влияние, характер и форму передачи информации и тому подобное. Многие люди меняют работу, потому что психологический климат в офисе не соответствует их психологическому настрою. Рассмотренные варианты решения вопросов эргономических особенностей организации труда, в контексте определения и регулирования психофизиологических отношений в коллективе, являются важной задачей, которую необходимо решать современным руководителям.

Предлагается применение новой методики по оценке рисков условий труда рабочих мест для определения психофизиологических особенностей работы сотрудников, работающих в офисах типа «Open space» с целью улучшения условий труда, повышения удовлетворенности работников работой и как следствие повышением эффективности труда. Сделаны выводы о возможности применения данной методики, проведена идентификация рисков и оценены риски на рабочих местах работников офисов типа «open space», даны рекомендации по улучшению условий труда на одном из предприятий города Харькова.

Ключевые слова: эргономика, условия труда, офис типа «Open space», анкетирование, психофизиологические особенности, риск-ориентированный подход, оценка риска.

V. V. BEREZUTSKYI, O. I. ILINSKA**ERGONOMIC PECULIARITIES OF ENSURING OF LABOR CONDITIONS IN OFFICES**

The issues of ergonomic provision of workplaces in the production facilities in which workers and the management team of enterprises and institutions are located are considered. Ergonomic issues are considered with respect to an important and relevant component of the psychophysiological characteristics of working conditions, which have recently had a very significant impact on the performance and health of workers. It is shown that the issue of ergonomics at present should be considered together with the issues of production culture and its component – safety culture. The system "man – machine – environment" is considered on the basis that the main link in this system is a person who is characterized by fluctuations in the psychological mood, which is associated with indicators of the physical, emotional, intellectual and intuitive biorhythms of each employee. In a modern technogenic environment, these indicators have a significant impact on human performance and labor safety. Modern approaches to solving ergonomic issues must be considered using a risk-based approach, namely, the use of risk maps, the identification (identification) of dangers that must be taken into account and the risks that arise when people communicate with each other, the impact on managers and the opposite effect, the nature and form of transmission of information and the like. Many people change jobs because the psychological climate in the office does not match their psychological mood. The considered options for addressing the ergonomic features of labor organization, in the context of determining and regulating psychophysiological relations in a team, are an important task that modern managers need to solve.

It is proposed to use a new methodology for assessing the risks of working conditions of workplaces to determine the psychophysiological characteristics of the work of employees working in «Open space» offices in order to improve working conditions, increase worker satisfaction with work and, as a result, increase labor efficiency. Conclusions are made about the possibility of applying this methodology, risk identification is carried out, and risks at the workplaces of «Open space» type office workers are assessed, recommendations are given for improving working conditions at one of the enterprises in Kharkiv.

Key words: ergonomics, working conditions, Open space office, questioning, psychophysiological characteristics, risk-based approach, risk assessment.

Вступ. Особистість не може сформуватися поза соціумом. Чим більше культурно-історичного досвіду придбала людина і використовує його у своїй діяльності, тим вона більш значима як особистість. Культура дає людині можливість усвідомити себе як особистість, опанувати прийнятними моделями поведінки. У якості найважливіших світоглядних і поведінкових аспектів, які формуються під впливом культури, слід відзначити усвідомлення себе і світу, спілкування і мову, одяг і зовнішність, культуру харчування, фізичну та репродуктивну культуру, цінності і норми, віру і переконання, розумові процеси і навчання, ставлення до роботи.

Виходячи із попереднього тезису, людина, як особистість, у суспільстві повина постійно розвивати захисну функцію в оволодінні культурою суспільного існування, в умовах загроз різних видів.

Вплив Європейського Союзу на Україну, окрім позитивних моментів, має і негативні наслідки. Створюється ситуація, коли висококваліфіковані спеціалісти їдуть на роботу за кордон, а ті що залишаються не мають необхідного кваліфікаційного рівня, що впливає на безпеку робіт, яку вони виконують. Небезпечна ситуація створюється і на підприємствах країн куди їдуть на заробітки із різних куточків земної кулі. Різні культури життєдіяльності впливають на типи нервової системи людей, а тому працівникам із різними культурами важко спільно

працювати, деіндеколи важко порозумітися. Менеджерам таких підприємств, важко організувати ефективну роботу полікультурних робочих бригад. Це створює умови, щодо появи небезпечних подій із важкими наслідками.

Тріада «культура – суспільство – особистість» – соціально-філософська і культурологічна проблема, яка включає в себе ряд аспектів. Це, зокрема, питання:

➤ роль особистості в культурі суспільства та її соціалізація (Рис.1);

➤ питання узгодження інтересів особистості і суспільства;

➤ питання ролі особистості в культурному (цивілізаційному) прогресі.

Соціалізація це активне відтворення людиною соціально – культурного досвіду, який вона набуває (знань, цінностей, норм, моралі, традицій тощо) на основі її діяльності, спілкування і відносин, обов'язковий фактор розвитку особистості.

Складні взаємовпливи і взаємозалежності культура – суспільство – особистість спонукають науковців розглядати їх у взаємозв'язку, що і обумовлює поняття їх «тріади» [1].

Стан культури на виробництві напряму пов'язано із вирішенням ергономічних питань. Ці високі вимоги закріплено у європейських стандартах.



Рис 1 – Особистість у суспільстві – соціалізація

З врахуванням новітніх технологій 21 сторіччя, автоматизацією робочих місць висуваються нові вимоги до умов праці і в першу чергу до ергономічних, а саме, психофізіологічних аспектів.

Дослідження в області ергономіки виконувались та виконуються багато років. Хороші напрацювання робились у НТУ «ХП», зокрема групою вчених лікарів гігієністів на чолі з доц. Мадієвським Юрієм Михайловичем. Вони займались питанням ергономіки різноманітних робочих місць та зробили багато публікацій по цій темі [2]. Актуальність питання

ергономіки робочих місць з часом не зменшилась, а підвищилась.

Сучасна ергономіка, як наука, що комплексно вивчає людину в праці, розглядає різнобічно систему «Людина-колектив-машина-середовище-соціум-культура-природа», має декілька напрямлень: фізична ергономіка, когнітивна та організаційна.

Фізична ергономіка концентрує увагу на анатомічних, біохімічних, фізіологічних та антропометричних параметрах людини, когнітивна – вивчає розумові процеси – пам'ять, сприйняття, мислення, моторні реакції, процеси прийняття рішень.

Організаційна ергономіка стосується оптимізації простору і часу. Питаннями організаційної ергономіки є комунікація, управління трудовими ресурсами, проектування діяльності і робочого часу, колективна робота, нові способи організації праці, дистанційна робота і управління якістю [3].

З розповсюдженням офісних приміщень типу «open space», збільшенням кількості людей, що працюють у таких офісах та займаються розумовою працею [4], з новим курсом євроінтеграції що обрала Україна, з'явилась необхідність нових підходів до організації робочих місць цих працівників [5, 6].

Метою ергономічних досліджень є оздоровлення праці та підвищення її ефективності. На теперішній час ергономіка є експериментальною наукою, яка буде свої висновки на підставі спостережень і спеціального проведених дослідів. В її розпорядженні широкий арсенал фізіологічних, психологічних і інших методів дослідження, які можуть дати надійну інформацію про стан людини [2]. Одним з поширених методів ергономічних досліджень є анкетування працівників. Для напряму організаційної психології цей метод є найбільш інформативним, тому що дозволяє визначити реакцію на зовнішні фактори, міжособистісні відношення та стан людини, черпаючи інформацію з джерела, з предмета дослідження – працівника.

Керівникам підприємств, відділів та інших керівних рівнів організацій, необхідно враховувати стан безпеки праці та здоров'я працівників згідно законів України та виходячи з їх соціальної відповідальності. Саме роботодавець повинен постійно контролювати стан виробничого середовища та трудового колективу, безпеку праці, організувати заходи, щодо поліпшення умов праці. Необхідно також контролювати вплив заходів, які виконано, на безпеку праці та здоров'я працівників.

З метою управління ризиками безпеки праці на виробництві застосовують ризик орієнтований підхід, який включає етапи ідентифікації небезпек, кількісної оцінки ризиків, облік, розробку та впровадження заходів по ліквідації або зменшенню ризиків у разі, якщо ризик не вдається повністю ліквідувати. Є багато методик по ідентифікації та кількісної оцінки ризиків [7, 8, 9, 10, 11]. Вони відрізняються джерелами, які використовуються для ідентифікації ризиків, способом обрахування величини ризиків, формою обліку – карткою ризиків. Деякі є складними та не зручними для впровадження на підприємствах, потребують багато часу на обробку даних, особливо, якщо підприємство велике та нараховує значну кількість робочих місць.

Оцінка ризиків є безперервною роботою. Змінюються характер роботи та робочі місця, тому зібрані при оцінці відомості легко застарівають. Змінюють ситуацію також заходи, запроваджені за результатами оцінки.

За допомогою регулярно повторюваних оцінок ризиків можна спостерігати зміну рівнів ризиків, виявляти появу нових ризиків, а також аналізувати

ступінь ефективності виконаних заходів з безпеки праці.

На практиці, потреба в черговій оцінці ризиків безпеки праці залежить від впровадження нових нормативно-правових документів, величини рівня ризику на робочому місці, від ресурсів, що є в розпорядженні та від змін, що відбуваються в умовах праці.

Мета дослідження. Метою дослідження є ідентифікація та оцінка основних психофізіологічних ризиків робочих місць офісних працівників, що працюють у приміщеннях типу «Open space» на прикладі середнього за розмірами приватного підприємства, надання рекомендацій по поліпшенню умов праці на цьому підприємстві.

Постановка задачі. Розробити підходи, щодо застосування методики визначення та оцінки ризиків, яку запропонували автор [11];

ідентифікувати основні психофізіологічні ризики які утворюються на робочих місцях у офісі типу «Open space»;

розробити рекомендації щодо поліпшення умов праці на підприємстві яке досліджувалось, відповідно до мінімізації психофізіологічних ризиків.

Методика дослідження. Визначення величини ризику проводилось за методикою, наведеною у автора [11]. Вона полягає у тому, що інформація черпається від працівників, враховуючі не тільки об'єктивні показники умов праці, а і суб'єктивні, що є важливим для психофізіологічної оцінки, ідентифікація ризиків та дані для кількісної оцінки отримується шляхом анкетування. Питання поділені за запропонованими видами ризиків, і наведено у відповідній анкеті: фізичні фактори небезпеки, небезпеки нещасного випадку, ергономіка, хімічні та біологічні фактори небезпеки, психологічне навантаження. Анкета містить питання: дані про робоче місце; прізвище, ім'я та по батькові працівника; перелік питань з ідентифікації ризиків; щодо мінімізації або усунення ризиків.

Величина ризику може бути оцінена як:

- 1 Малозначущий ризик;
- 2 Малий ризик;
- 3 Помірний ризик;
- 4 Значний ризик;
- 5 Неприпустимий ризик.

Висновок о величині ризику роблять оцінюючи вірогідність виникнення небезпечної ситуації та ступінь важкості наслідків. Визначити величину ризику можна за допомогою таблиці 1. Відсутність необхідності присвоювати даним та обраховувати чисельні значення робить цей метод оцінки ризиків легким та швидким, оцінку можна робити відразу при анкетуванні.

Таблиця 1 – Визначення величини ризику

Вірогідність	Наслідки		
	Легкі або незначні	Середньої тяжкості або помірно значимі	Важкі або серйозні
<i>Мала.</i> Випадкові небезпечні ситуації виникають рідко	1 Малозна- чущий ризик	2 Малий ризик	3 Помірний ризик
<i>Середня.</i> Небезпечні ситуації виникають щоденно	2 Малий ризик	3 Помірний ризик	4 Значний ризик
<i>Висока.</i> Ситуації небезпеки постійні протягом робочого часу	3 Помірний ризик	4 Значний ризик	5 Неприпус- тимий ризик

Результати дослідження. Аналіз ризиків проводився на приватному електротехнічному підприємстві у м. Харків, Україна. Підприємство виконує комплексні завдання в області проектування, виготовлення і монтажу систем електропостачання та автоматизації, має власне виробництво. Кількість працюючих налічує 40 робітників, з яких 26 офісних працівників. Дане дослідження проводилось серед співробітників, що працюють в офісах типу «Open space».

Всі робочі місця офісних працівників обладнано комп'ютерною технікою. Посади, які досліджувались: інженери-проектувальники, інженери-конструктори, менеджери, економісти, начальники цих відділів. Четверо з офісних працівників працюють в окремих кабінетах, інші у офісах типу «open space». Офісні приміщення достатньо великої площі, більше ніж 6 м² на одного працюючого, робочі місця обладнано необхідною офісною технікою та меблями. Вік працівників від 25 до 55 років. Розподіл працівників за статтю – дві третини чоловіків та одна третина жінки.

За атестацією робочих місць офісних працівників цього підприємства клас умов праці 2, параметри мікроклімату на робочих місцях, еквівалентний рівень шуму, рівень освітленості знаходяться у допустимих нормативами межах. Висновок проведеної перед дослідженням атестації робочого місця: «Робоче місце відповідає технічному та організаційному рівню, оснащено всіма необхідними інструментами та пристосуваннями. Робоче місце не має у наявності шкідливих та небезпечних факторів».

За методикою [11] проводилось анкетування працівників, та крім стандартних питань, що наведено у анкеті було додано декілька додаткових питань з огляду на особливості праці в офісах типу «Open space», а саме:

- що під час роботи в офісах відкритого типу відволікає та дратує,
- чи хотіли би ви, щоб ваше робоче місце було відокремлено від загального простору перегородкою,
- чи хотіли би ви працювати в окремому кабінеті.

Обговорення результатів дослідження. За даними анкетування 92 % працюючих оцінила «роботу з комп'ютером» як фактор ризику, та надала їй оцінку 2 малий ризик (30 % опитаних) , 3 помірний ризик (46 %), 1 малозначний та 4 значний ризик (по 8 %). Довге положення сидячи, як ризик фізичного перевантаження визначило 69 % опитаних (розподіл по оцінці ризику: 1 малозначний ризик – 50%, 2 малий ризик – 25%, 3 помірний ризик – 25%) (рис. 2). Ідентифікувало наявність ризику від «положення тіла під час роботи», в основному спина, 43 % опитаних, але в ході співбесіди називали основною причиною виникнення проблем причини, не пов'язані з сидячою офісною роботою, але відмічало погіршення стану під час сидячої роботи (розподіл по оцінці ризику: 1 малозначний ризик – 37 %, 2 малий ризик – 25 %, 3 помірний ризик – 18 %, 4 значний ризик -18 %).

В частині «Психологічні перевантаження» як робочий ризик було ідентифіковано:

- «довге знаходження в зосередженому стані» – 61% (розподіл по оцінці ризику: 1 малозначний ризик – 50%, 2 малий ризик – 25%, 3 помірний ризик – 25%);
- «навантаження від вимушеного контактування з іншими особами» – 43 % (розподіл по оцінці ризику: 1 малозначний ризик – 67%, 2 малий ризик – 23%);
- «необхідність виконувати роботу у поспіху» – 76%, (розподіл по оцінці ризику: 1 малозначний ризик – 70%, 2 малий ризик – 20%, 3 помірний ризик – 10%);
- «занадто високі вимоги та цілі, що висуваються працівникові» – 30 %, (розподіл по оцінці ризику: 1 малозначний ризик – 75%, 3 помірний ризик – 25%);
- «розподіл праці, схема роботи та відповідальність» – 53 %, (розподіл по оцінці ризику: 1 малозначний ризик – 29 %, 2 малий ризик – 71 %);
- «невпевненість у трудових відносинах», прикладом яких може бути робота по строковому договору, часткова зайнятість, загроза закінчення трудового договору – 15%, (розподіл по оцінці ризику: 1 малозначний ризик – 100%);
- «недоліки в керівництві роботою або організацією» – 35 %, (розподіл по оцінці ризику: 1 малозначний ризик – 80 %, 2 малий ризик – 20 %);
- «недостатність інформації по ходу робіт» – 69%, (розподіл по оцінці ризику: 1 малозначний ризик – 98 %, 2 малий ризик – 11 %, 3 помірний ризик – 11 %);
- «конфлікти та некоректні відношення» – 30 %, (розподіл по оцінці ризику: 1 малозначний ризик – 100 %)
- «відсутність можливості впливу на трудовий процес» – 15 %, (розподіл по оцінці ризику: 1 малозначний ризик – 50%, 2 малий ризик – 50 %).

53 % опитаних відволікає та дратує шум, офісного населення (розмови на професійні та непрофесійні теми, пересування по офісу та інше), а 70 % відсотків відмічало, що в процесі роботи в основному шум від

розмов співробітників та їх діяльності, є дратуючим та відволікаючим для них фактором.

В цілому, 70 % працівників подобається працювати у офісах типу «Open space», відмічаючи переваги легкої комунікації, швидкого вирішення робочих питань, задоволеність можливістю спілкування на професійні та непрофесійні теми зі

співробітниками та вважають роботу в офісах «Open space» ефективною для себе. 30% бажають відокремити свій робочий простір за допомогою хоча б перегородок, 23 % бажали би мати свій окремий кабінет.

Дані за цими показниками в наочній формі діаграми наведено на рис. 2.

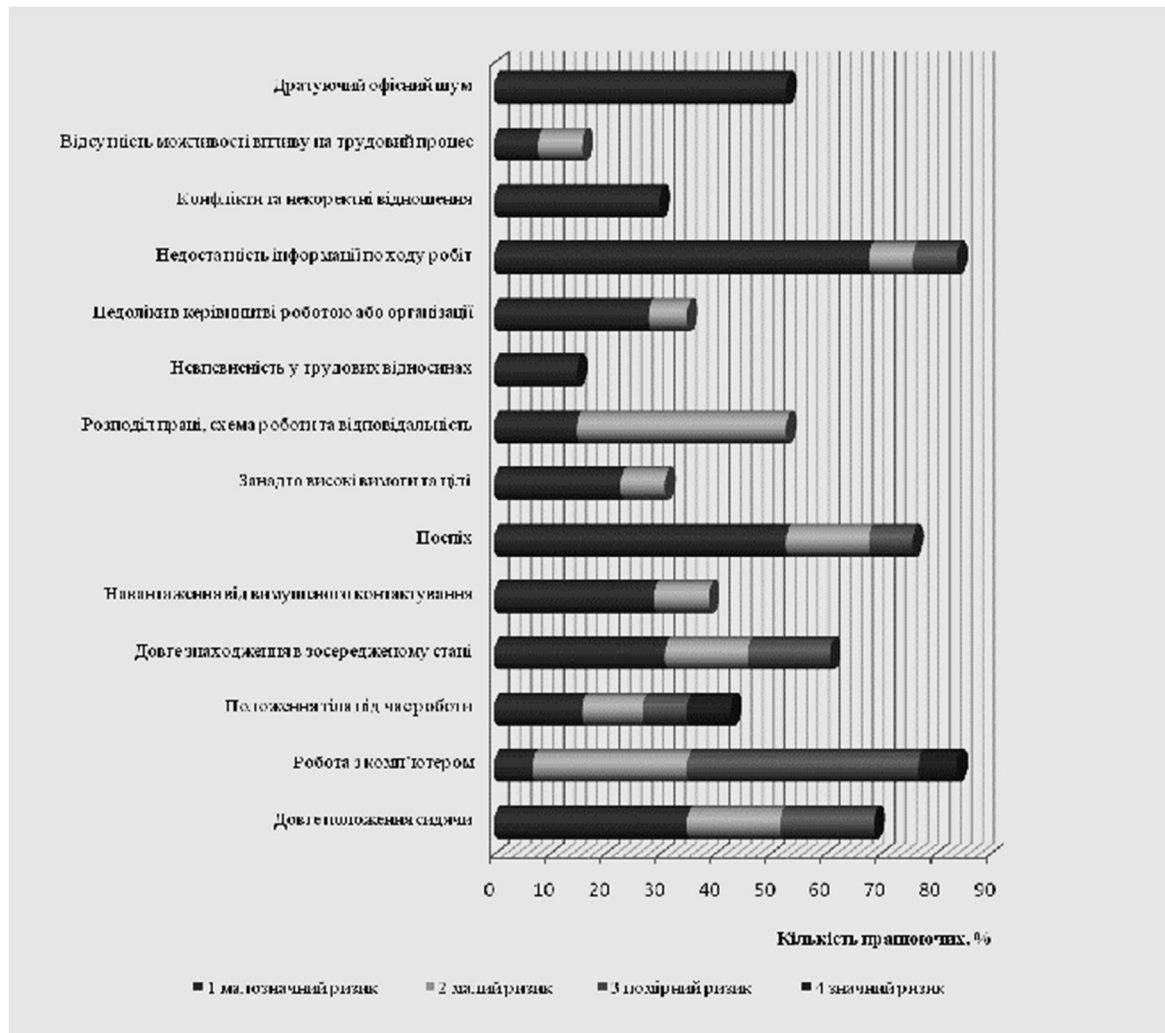


Рис. 2 – Ідентифіковані ризики, що стосуються ергономіки та психологічних навантажень на робочих місцях працівників офісів типу «Open space» з врахуванням величини ризику

Обговорення результатів досліджень. Робота офісних працівників переважно є сидячою, але значення ризику працівників визначали як помірний або малий, тобто як той що не призводить до тяжких наслідків для здоров'я, інша половина опитаних не вважає що їх робота має ризики «сидячої роботи».

Невеликі показники оцінки психологічних ризиків по всіх показниках говорять про те, що на даний момент компенсуючи механізми всередині колективу працюють, та не дають проблемам суттєво впливати на робочий процес, але, слід звернути увагу на ці проблеми, особливо на тих працівників, де ризик найбільший. Вирішуючи питання на етапах, коли ризик мінімальний можна досягти більш ефективної праці, підвищити рівень задоволеності працею

працівників, і це, як наслідок може мати позитивний соціальний та економічний ефект для всього підприємства.

За цим анкетуванням можна зрозуміти яка ділянка, або який відділ страждає від недостатньої компетенції або недостатньої уваги зі сторони керівника до організації робіт, де є вузьке місце робіт і працівникам часто доводиться працювати в поспіху, в якому підрозділі склалася погана робоча атмосфера. Додаючи питання до анкети згідно особливостей роботи, можна виявити причину та шляхи з покращення ситуації.

Даний метод визначення ризиків дозволяє як ідентифікувати виробничі ризики так і проаналізувати їх у якісному і кількісному вигляді. Методика проста,

гнучка, що дозволяє її використовувати на різних, за напрямом діяльності підприємствах, та для різних типів робочих місць, у тому числі для офісних працівників. За допомогою цього методу можна визначити в яких умовах людина буде ефективно працювати. Як засіб з підвищення працездатності можна перевести деяких працівників в окремі кабінети, або в офіси з меншою чисельністю працівників, або навпаки, об'єднати в одному офісі працівників, яким зручно працювати разом за професійною необхідністю та характером.

Так як основний дратуючий фактор в офісному приміщенні для багатьох є шум, то можна запропонувати такі заходи для зменшення шуму як мобільні багатофункціональні перегородки різних конструкцій [12, 13], винесення зони з шумною оргтехнікою за межі офісного приміщення та інше. Багато з заходів, що поліпшують ергономічні умови праці в офісах, особливо у таких, які належать до типу «Open space», є відносно мало затратними або зовсім не затратними, що є суттєвим аргументом до їх використання.

Висновки. Дослідженнями встановлено, що для офісних працівників є актуальними питання ергономіки та психологічних навантажень. Найвищі показники ризику було надано факторам таким як: недостатність інформації щодо виконання робіт, необхідність працювати у поспіху, довго знаходитись у напруженому стані, у сидячому положенні, а також факторам, що пов'язані з роботою за комп'ютером. З невеликими показниками ризику було ідентифіковано такі фактори ризику роботи працівників в офісних приміщеннях: навантаження від вимушеного контактування з іншими особами, занадто високі цілі та вимоги, що ставляться перед працівником, розподіл роботи, схема роботи та розподіл відповідальності, невпевненість у трудових відносинах, недоліки у керівництві роботою, відсутність можливості впливати на хід робіт. Одним з самих відволікаючих та дратуючих чинників роботи є офісний шум.

Результати досліджень та оцінки ризиків можна використовувати при плануванні та переплануванні робочих місць, при розробці інструкцій з охорони праці, при розподілі робіт та обов'язків, при рішенні кадрових питань з метою поліпшення умов праці, психологічного комфорту працюючих, і як наслідок підвищення ефективності праці.

Рекомендується, для найбільш ефективної роботи персоналу, робити розташування робочих місць з врахуванням характеру роботи, особливостей характеру та потреб працівників, використовувати мобільні та багатофункціональні перегородки, які дозволять зменшити рівень шуму, відокремити робочі місця, створити комфортний особистий простір працівнику.

Керівництву підприємства, слід звертати більше уваги на організацію та розподіл робіт керівниками підрозділів серед співробітників, збільшити інформованість про хід роботи працівників, змінити деяким працівникам розташування робочого місця.

Методику анкетування, яку була використано у дослідженнях для визначення ризиків та їх кількісної оцінки, можна рекомендувати щодо використання визначення психофізіологічного комфорту працівників, виявлення несприятливих для робочого процесу факторів на різних типах підприємств.

Список літератури

1. Чернявская Ю. В. Народная культура и национальные традиции. – Минск. 1998.
2. Мадиевский Ю.М. Курс лекций по эргономике / под ред. д-ра техн. наук., проф. Березуцкого В.В. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2015. 294 с.
3. Карапузова Н. Д., Починок С. А., Помогайбо В. М. Основы педагогической эргономики – Київ : Академвидав, 2012. – 192 с.
4. Харчук Л. Офіс: медогляд. // *Охорона праці*. 2018. №11. – С. 48–51.
5. Глебова А. О., Карчевський Б. О. Системи управління якістю на підприємстві в умовах євроінтеграційних процесів. // *Глобальні та національні проблеми економіки*. 2015. №8. – С. 352–356. URL: <http://www.global-national.in.ua/archive/8-2015/73.pdf> (дата звернення: 12.10.2019).
6. Гринкевич С. С. Трансформаційні зміни національного ринку праці в умовах євроінтеграції. // *Бізнес Інформ*. 2014. № 10. – С. 197–202. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/binf_2014_10_33 (дата звернення: 10.10.2019)
7. Березуцький В. В. Ризик орієнтований підхід в охороні праці. [Б. м.] : LAP Lambert Academic Publishing, 2019. – 108 с.
8. Березуцький В.В., Адаменко М.І. Небезпечні виробничі ризики та надійність: навч. посібник. – Харків: ФОП Панов А.М., 2016. – 385 с.
9. Віткін, Л. М., Ролько О. Р. Методика оцінювання ступеню професійного ризику в умовах виробничої діяльності на м'ясопереробному підприємстві. // *Системи обробки інформації*. 2016. №2. – С. 156–159.
10. Якоб, И. С. Карта рисков как элемент программы управления рисками. // *Вестник экономической науки Украины*. 2010. №1 (17). – С. 160–162.
11. Муртонен М. Оценка рисков на рабочем месте. Практическое пособие: / Серия охрана труда: Международный опыт. Выпуск 1. Опыт Финляндии. Москва : Субрегиональное бюро МОТ для стран Европы и Центральной Азии, 2007. – 63 с.
12. Berezutsky V., Ilinska O., Vaskovets L., Mezentseva I., Khalil V. Determining the effect of multifunctional partitions on noise level at "Open space" offices. // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. № 2/10(98). – P. 18–26. DOI 10.15587/1729-4061.2019.164786
13. Berezutsky V., Berezutska N., Ilinska O., Raiko V. Studying the effect of multifunctional partitions on temperature indicators at offices of the Open space type. // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. № 4/10(94) – P. 13–22. DOI 10.15587/1729-4061.2018.141014

References (transliterated)

1. Chernyavskaya Yu. V. Narodnaya kul'tura i natsional'nye traditsii. [Folk culture and national traditions]. – Minsk. 1998.
2. Madiievskiy Yu.M. Kurs lektsiy po ergonomike [Ergonomics lecture course]. Kharkiv: NTU «KhPI», 2015. – 294 p.
3. Karapuzova N. D., Pochynok Ye. A., Pomohaybo V. M. Osnovy pedahohichnoyi erhonomiky [Basics of pedagogical ergonomics]. Kiev, Akademydav Publ., 2012. – 192 p.
4. Kharchuk L. Ofis: medohlyad [Office: physical examination]. // *Okhorona pratsi*. 2018, №11, pp. 48–51.
5. Hlyebova A. O., Karchevskyy B. O. Systemy upravlinnya yakistyu na pidpryyemstvi v umovakh yevrointehratsiynikh protsesiv [Quality management systems at the enterprise in the context of European integration processes.]. // *Hlobal'ni ta natsional'ni problemy ekonomiky*. 2015, No. 8, pp. 352–356. Available at: <http://www.global-national.in.ua/archive/8-2015/73.pdf> (accessed 12.10.2019).
6. Hrynkevych S. S. Transformatsiyni zminy natsional'noho rynku pratsi v umovakh yevrointehratsiyi [Transformational changes in the national labor market in the context of European integration.]. //

- Biznes Inform.* 2014, No. 10, pp. 197–202. Available at: http://nbuv.gov.ua/UJRN/binf_2014_10_33 (accessed 10.10.2019)
7. Berezuts'kyi V. V. *Ryzyk oriyentovanyy pidkhd v okhoroni pratsi* [Risk oriented approach in occupational safety], LAP Lambert Academic Publishing, 2019. – 108 p.
 8. Berezuts'kyi V. V., Adamenko M. I. *Nebezpechni vyrobnychi ryzyky ta nadiynist'* [Dangerous production risks and reliability]. – Kharkiv, FOP Panov A. M. Pub., 2016. – 385 p.
 9. Vitkin L. M., Rol'ko O. R. *Metodyka otsynuvannya stupenyu profesiynoho ryzyku v umovakh vyrobnychoyi diyal'nosti na m"yasopererobnomu pidpryyemstvi* [Methods of estimation of the degree of professional risk in the conditions of production activity at the meat processing enterprise. Information processing systems]. // *Systemy obrobky informatsiyi*. 2016, No. 2, pp. 156–159.
 10. Jakos' I. S. *Karta riskov kak jelement programmy upravlenija riskami* [Risk map as part of risk management program. // *Journal of Economic Science of Ukraine.*]. *Vestnik jekonomicheskoy nauki Ukrainy*. 2010, No. 1 (17), pp. 160–162.
 11. Murtonen M. *Ocenka riskov na rabochem meste* [Workplace Risk Assessment]. / *Seriya ohrana truda: Mezhdunarodnyy opyt. Vypusk 1. Opyt Finljandii*. Moscow, Subregional'noe bjuro MOT dlja stran Evropy i Central'noj Azii, 2007. – 63 p.
 12. Berezutsky V., Ilinska O., Vaskovets L., Mezentseva I., Khalil V. *Determining the effect of multifunctional partitions on noise level at "Open space" offices.* // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019, No. 2/10(98), pp. 18–26. doi: 10.15587/1729-4061.2019.164786
 13. Berezutsky V., Berezutska N., Ilinska O., Raiko V. *Studying the effect of multifunctional partitions on temperature indicators at offices of the Open space type.* // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018, no. 4/10(94), pp. 13–22. doi: 10.15587/1729-4061.2018.141014

Надійшла (received) 15.10.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Березуцький Вячеслав Володимирович (Березуцкий Вячеслав Владимирович, Berezutskyi Viacheslav Vladymyrovych) – доктор технічних наук, професор, завідувачий кафедрою «Охорона праці та навколишнього середовища», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7318-1039>; e-mail: viaberezuc@gmail.com

Ільїнська Ольга Ігорівна (Ильинская Ольга Игоревна, Pînska Olha Igoryvna) – старший викладач кафедри «Охорона праці та навколишнього середовища», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6617-5354>; e-mail: souzbgd@gmail.com

УДК 621.791.72:621.791.052:620.17

*И. В. КАСЬЯНЕНКО***ОСОБЕННОСТИ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ МЕТАЛЛА
СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТРУБОПРОВОДОВ**

В работе на основании проведенной оценки технологических, конструкционных и эксплуатационных факторов, которые влияют на надежность сварных соединений трубопроводов, на виды и скорость развития возникающих в них дефектов, было установлено, что для оценки надежности соединений трубопроводов после длительной эксплуатации недостаточно проведения стандартных исследований механических свойств сварных швов. Предложено в качестве критерия оценки надежности сварных соединений трубопроводов использовать такую характеристику дефектов, как их сопротивление разрушениям.

Ключевые слова: дефекты, сварные соединения, трубопроводы, надежность, сопротивление, повреждаемость.

*I. V. KASYANENKO***ОСОБЛИВОСТІ ПОШКОДЖУВАНІСТІ МЕТАЛУ
ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ТРУБОПРОВОДІВ**

В роботі на підставі проведеної оцінки технологічних, конструкційних і експлуатаційних факторів, які впливають на надійність зварних з'єднань трубопроводів, на види і швидкість розвитку дефектів що виникають в них, було встановлено, що для оцінки надійності з'єднань трубопроводів після тривалої експлуатації недостатньо проведення стандартних досліджень механічних властивостей зварних швів. Запропоновано в якості критерію оцінки надійності зварних з'єднань трубопроводів використовувати таку характеристику дефектів, як їх опір руйнуванню.

Ключові слова: дефекти, зварні з'єднання, трубопроводы, надійність, опір, пошкоджуваність.

*I. V. KASYANENKO***FEATURES OF DAMAGE TO METAL OF WELDED PIPELINES**

The aim of the work is to establish the causes of defects in welded joints of pipelines and factors affecting the size and speed of their development. In the work, an assessment was made of the technological, structural and operational factors affecting the reliability of welded joints of pipelines, the types and speed of development of defects arising in them. It was found that to assess the reliability of pipeline connections after long-term operation, it is not enough to conduct standard studies of the mechanical properties of welds. It is proposed to use such a characteristic of defects as fracture resistance as a criterion for assessing the reliability of welded joints in pipelines. It was established that the damageability of the welded joints of pipelines and the assessment of their defects, in general, depends on the joint manifestation of technological, structural and operational factors. The presented research results make it possible to conclude that to evaluate the reliability of welded joints of pipelines after long-term operation, it is not enough to conduct standard studies of mechanical properties. Criteria for assessing the reliability of pipelines should be the characteristics of defects or the value of resistance to fracture of welded joints.

Key words: defects, welded joints, pipelines, reliability, resistance, damageability.

Введение. В мировой практике передача нефти, газа, теплоносителей и т.д. выполняется в основном по транзитным трубопроводам.

Протяженность трубопроводов в разных странах постоянно увеличивается. Одновременно осуществляется их модернизация и техническое перевооружение, внедряется современное сопутствующее оборудование, новые средства управления потоками рабочего тела, новые системы контроля, внедряются более совершенные технологии обслуживания и ремонта. Одним из важных направлений повышения надежности новых и вновь вводимых трубопроводов является совершенствование выполнения сварных соединений и контроля их качества. Такое внимание и повышенный контроль состояния сварных швов определяется достаточно частыми дефектами сварки, которые, согласно собранному известным статистическим данным, были установлены как во время испытаний, так и в ходе эксплуатации [1].

Для обеспечения прочности сварного соединения участков трубопровода необходимо не допускать и/или своевременно выявлять явные и образующиеся дефекты сварных соединений на этапе их выполнения

даже в полном соответствии утвержденным технологическим процессам [2, 3].

Дефекты сварных соединений трубопроводов имеют отличительные особенности, на основании которых можно выполнить их классификацию по степени влияния на работоспособность, по причинам и местам появления, [4–7]:

- дефекты, объединенные местом зарождения;
- дефекты, объединенные одинаковыми причинами возникновения;
- дефекты, объединенные тем, что для их обнаружения использовались одинаковые системами контроля;
- классификация по величине разрушенной зоны: макро– и микродефекты.

Такое разнообразие и высокая вероятность появления дефектов в местах соединения трубопроводов, в сварных швах, определяет необходимость непрерывного контроля и совершенствования способов диагностики их состояния. Это, в свою очередь, определяет актуальность проведения исследований причин появления и оценки величины и вида дефектов сварных соединений трубопроводов, особенно

находящихся в длительной эксплуатации, т.е. в состоянии физического износа.

Цель работы. Целью работы является установление причин появления дефектов в сварных соединениях трубопроводов и факторов, влияющих на величину и скорость их развития.

Изложение основного материала. Оценку дефектов сварных соединений трубопроводов производят на основе методов контроля, которые включают:

- внешний осмотр по ГОСТ 3242-79;
- люминесцентную и цветную дефектоскопию в соответствии с ГОСТ 18442-80;
- выполнение испытаний на твердость по ГОСТ 22761-77;
- применение экспресс-анализа химического состава шва;
- исследование содержания ферритной фазы в швах по ГОСТ 2246-70;
- технологическую пробу контролируемого сварного соединения по ГОСТ 3242-79;
- исследование макроструктуры и металлографии по ГОСТ 3242-79;
- процесс определение склонности полученных швов к межкристаллитной коррозии в соответствии с ГОСТ 6032-2003;
- капиллярный метод, который предназначен для определения герметичности сварного шва;
- определение плотности на основании пневматического испытания, применение вакуум-метода или метода химических реакций по ГОСТ 3242-79;
- методы гидравлических испытаний;
- процесс просвечивания радиоактивным источником сварных соединений в соответствии с ГОСТ 7512-82;
- методы магнитографического контроля по ГОСТ 25225-82;
- ультразвуковой метод контроля в соответствии с ГОСТ 14782-86.

Последние три метода нашли широкое применение в последние десятилетия. Однако в условиях мирового экономического кризиса чаще стали использовать другие перечисленные выше методы контроля сварных соединений трубопроводов, которые являются более дешевыми по сравнению с тремя последними.

Для ответственных трубопроводов в последние годы стали использовать и способы, которые требуют применения достаточно дорогого оборудования. В частности, начали применять внутритрубные самоходные радиографические установки, позволяющие диагностировать сварные соединения из центра трубы за одну экспозицию.

На основании визуального осмотра дефекты сварных соединений трубопроводов, которые приводят к последующим разрушениям, можно классифицировать как [7, 8]:

- с наличием подрезов;
- с образующимися наплывами;

– дефекты, в которых возникают разрушения внешних и внутренних швов при смещении;

– с появляющимися неравномерностями по высоте и ширине шва вдоль его длины;

– с возникающими порами по глубине шва;

– дефекты, возникающие от шлаковых включений.

Такие дефекты проявляются при изготовлении и при монтаже сварных соединений трубопроводов. Эскизы возможных формирований дефектов приведены на рис. 1.

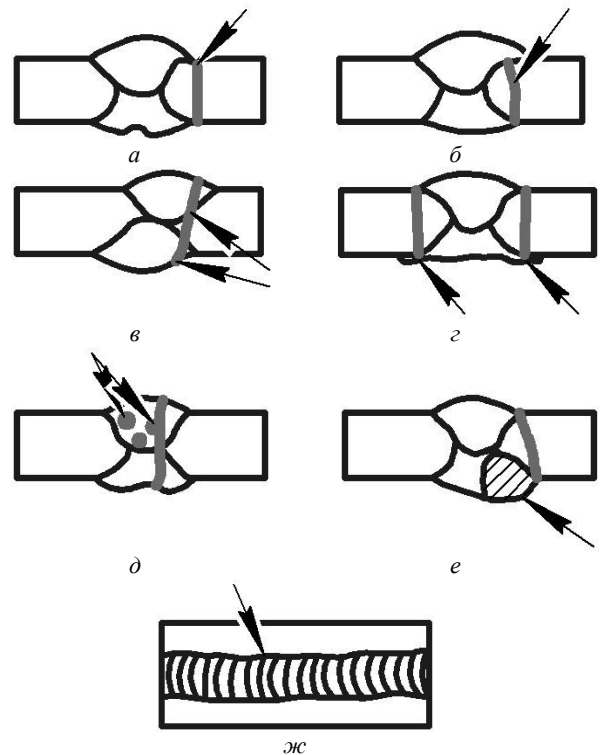


Рис. 1 – Схемы формирований дефектов сварных соединений трубопроводов, приводящие к разрушениям: а – с возникающими подрезами; б – с возникающими наплывами; в – с возникающим расхождением соединений при смещении; г – возникающие при наличии остаточных напряжений из-за неполного снятия усилий; д – дефекты от внутренних пор или шлаковых включений; е – от заводских дефектов из-за нарушений технологии; ж – дефекты, вызванные неравномерностью выполнения высоты и ширины шва вдоль его длины

Дефекты в сварных швах также могут быть вызваны неравномерностью напряжений в них из-за разрушения массива трубопровода или разрушения шва при его выполнении по его длине. Таким разрушениям характерно локальное и лавинное сосредоточение. Согласно нашим исследованиям, четкой классификации появления и развития дефектов в сварных швах из-за общего разрушения трубопровода и в продольных сварных швах нет. Но исследования ведутся, т.к. возникающие при этом проблемы весьма серьезны.

Для исследования экспериментально был создан дефект сварного шва магистрального газопровода из стали 14Г2САФ размером 1220x11 м, который привел

к его разрушению на протяженности 133 м [8]. Напряжение разрушения было создано по программе пневмоиспытаний путем создания избыточного давления в 6,1 МПа. Результаты исследований приведены на рис. 2.

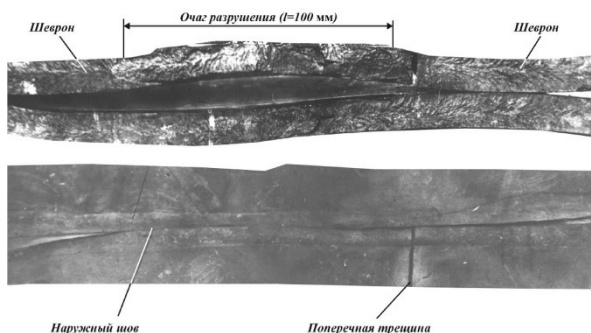


Рис. 2 – Пример формирования и развития очага разрушения в сварном шве магистрального газопровода размером 1220x11 м при пневмоиспытании (P=6,1 МПа)

Результаты лавинного разрушения трубопровода протяженностью 373 м (размер трубопровода 1220x12 м) приведен на рис. 3 [8].

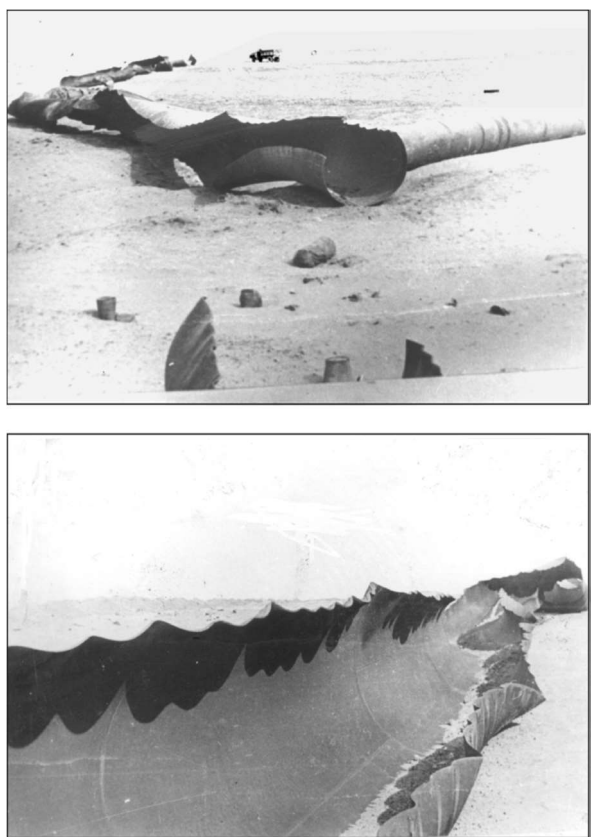


Рис. 3 – Пример результатов лавинного разрушения трубопровода размером 1220x12 м (Сталь 17Г1С)

В результате исследований (исследование фото дефекта по длине сварного шва, рис. 2) установлено, что при вязком (пластическом) разрушении шевронный узор практически не образуется.

Известно, что в зоне сварных соединений происходит изменение структуры в близких ко шву зонах, что приводит к снижению их пластичности и устойчивости к внешним нагрузкам. Однако опыт эксплуатации трубопроводов показал, что специальных приемов для обеспечения равной прочности и пластичности сварного соединения и основного металла трубопровода выполнять не надо. Но запас прочности в созданном сварном соединении должен быть достаточным, чтобы без последствий выдерживать максимальное давление, определенное условиями эксплуатации трубопровода. Т.е. напряжение, которое без следов пластической деформации, без формирования дефектных зон в сварном шве допустимо при работе с максимальным давлением:

$$\sigma_6^c = K^c \sigma_6, \tag{1}$$

где σ_6^c и σ_6 – нормальные напряжения в сварном соединении трубопровода и в массиве металла трубопровода соответственно;

K^c – коэффициент возможного снижения прочности металла в зоне сварного соединения трубопровода по сравнению с остальным металлом трубопровода, (индекс «с» указывает на принадлежность к сварному соединению).

Необходимо отметить, что σ_6^c представляет собой не просто напряжение текучести материала, а определяет агрегатную прочность сварного шва в зоне соединения элементов трубопровода.

В качестве примера для понимания указанных в (1) величин и коэффициента, рассмотрим режим работы трубопровода с нагрузкой, которая обеспечивает величину внутреннего давления равного половине максимально допустимого ($F_{max} = 0,5$), [8].

Тогда для этого случая можно записать:

$$F_{max} = A_0 \frac{2\sigma_6^c(\epsilon_6^c)}{\sqrt{3}} = A_0 \frac{2\sigma_6(\epsilon_6)}{\sqrt{3}}, \tag{2}$$

где A_0 – площадь зоны сварного соединения трубопровода;

ϵ_6^c и ϵ_6 – относительные прочности сварного соединения трубопровода и самого металла трубопровода (соответственно). Учитывая условия выбранного режима:

$$\epsilon_6^c = \epsilon_{6m}^{\exp(3m)^c}, \quad \epsilon_6 = \epsilon_{6m}^{\exp(3m)}, \tag{3}$$

Если пренебречь деформацией сварного соединения трубопровода, что вполне допустимо [6,8], из (2) можно получить следующее равенство:

$$\sigma_6^c \frac{2\epsilon_6^c}{\sqrt{3}} = \sigma_6 \frac{2\exp(\epsilon_6/2)}{\sqrt{3}}, \tag{4}$$

Тогда, согласно (1) и (4) получаем выражение для коэффициента K^c :

$$K^c = \left(\frac{1}{2}\right)^{\sigma_{\epsilon}} \exp\left(\frac{\epsilon_{\theta}}{2}\right). \quad (5)$$

На рис. 4 представлена графическая зависимость возможного ослабления существующей прочности сварного соединения трубопровода от его относительной прочности. Расчет выполнен для различных режимов работы трубопровода с нагрузкой, которая обеспечивает величину внутреннего давления в разных долях от максимально допустимого F_{\max} , по алгоритму (5).

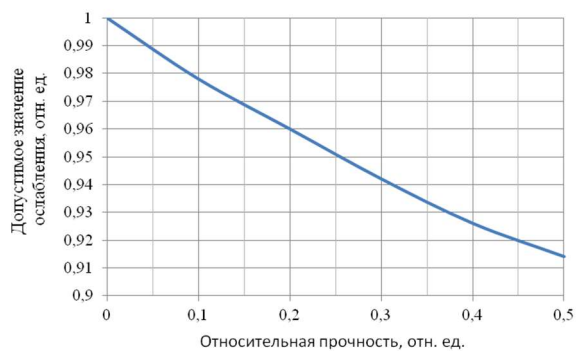


Рис. 4 – Графическая зависимость допустимого значения возможного ослабления существующей прочности сварного соединения трубопровода от его относительной прочности

Обсуждение результатов. Из полученной графической зависимости (рис. 4) можно сделать вывод, что значения коэффициента K_{θ}^c в разных режимах нагрузки (при разном избыточном внутреннем давлении) незначительно отличаются друг от друга и от единицы. Но они позволяют оценить величину и установить допустимую зону ослабления механической прочности отдельных зон сварных соединений трубопровода с точки зрения сохранения их прочности. Установлено, что допустимое значение возможного ослабления существующей прочности сварного соединения трубопровода будет тем больше, чем выше пластичность самого материала.

Возможные разрушения трубопроводов происходит в ослабленной области. Однако при максимальном давлении в трубопроводе разрушение будет расширяться лавинообразно, независимо от места начала формирования дефекта и ослабленной зоны. Последующее ослабление прочности сварного соединения трубопровода при условии $K_{\theta}^c \leq K^c$ приведет к разрушению по растущей ветви диаграммы давление-деформация.

Выводы. Установлено, что повреждаемость сварных соединений трубопроводов и оценка их дефектов, в отдельности, и надежности, в целом, зависит от совместного проявления технологического, конструкционного и эксплуатационного факторов. Поэтому актуальным является применение более дешевых методов контроля дефектов, поскольку это

упрощает процесс оценки дефектов сварных соединений трубопроводов.

Также следует отметить, что для оценки надежности сварных соединений трубопроводов представляется целесообразным выполнять изучение зависимости повреждаемости сварных соединений от появления дефектов, а также от их структурного состояния, что необходимо для продления ресурса наработки сварных соединений.

Представленные результаты исследований дают возможность сделать вывод, что для оценки надежности сварных соединений трубопроводов после длительной эксплуатации недостаточно проведения стандартных исследований механических свойств. Критериями оценки надежности трубопроводов должны быть характеристики дефектов или величины сопротивления разрушению сварных соединений.

Список литературы

1. API: Welding of pipelines and related facilities API 1104 20th Edition Incorporating 2007, Amendments Washington: American Petroleum Institute, 2007. 12-14 pp.
2. Huising OJC: Theory and practice: implementation of the revised EPRG Tier-2 guidelines Paper S16-01. In: 6th International Pipeline Technology Conference, Ostende, October 6-9 2013. Great Southern Press.
3. Касьяненко И.В. Особенности повреждаемости длительно эксплуатируемых сварных соединений паропроводов // Энергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. Вісник НТУ «ХПИ». 2019. №3
4. BSI: Gas supply systems – Welding steel pipework – functional requirements BS EN 12732 London: British Standards Institution, 2000. 34 p
5. Standards Australia: Pipelines – Gas and liquid petroleum Part 2: Welding AS 2885.2-2007 Homebush, New South Wales: Standards Australia, 2007. 57 p.
6. Andrews RM and Morgan LL: Integration of automated ultrasonic testing and engineering critical assessment for pipeline girth weld defect acceptance. In: Fourth International Conference on Pipeline Technology, Ostende, May 9-13 2004. Scientific Surveys: Beaconsfield. pp. 655-667.
7. Knauf G and Hopkins P: The EPRG guidelines on the assessment of defects in transmission pipeline girth welds. 3R International 1996, 35(10/11), p. 620-4.
8. Ланчаков Г.А., Зорин Е.Е., Пашков, Ю.И., Степаненко А.И. Работоспособность трубопроводов: в 3-х ч. // Ч. 2. Сопротивляемость разрушению. – М.: Недра-Бизнесцентр, 2001. – 350 с.

References (transliterated)

1. API: Welding of pipelines and related facilities API 1104 20th Edition Incorporating 2007, Amendments Washington: American Petroleum Institute, 2007. 12-14 pp.
2. Huising OJC: Theory and practice: implementation of the revised EPRG Tier-2 guidelines Paper S16-01. In: 6th International Pipeline Technology Conference, Ostende, October 6-9 2013. Great Southern Press.
3. Kasyanenko I.V. Specific features of the damageability of the welded joints of steam pipelines that have been in service for a long time// Energetychni ta teplotekhnichni protsesy y ustatkuvannya. Visnyk NTU "KHPI". 2019. No 3.
4. BSI: Gas supply systems – Welding steel pipework – functional requirements BS EN 12732 London: British Standards Institution, 2000. 34 p.
5. Standards Australia: Pipelines – Gas and liquid petroleum Part 2: Welding AS 2885.2-2007 Homebush, New South Wales: Standards Australia, 2007. 57 p.
6. Andrews RM and Morgan LL: Integration of automated ultrasonic testing and engineering critical assessment for pipeline girth weld defect acceptance. In: Fourth International Conference on Pipeline

- Technology, Ostende, May 9-13 2004. Scientific Surveys: Beaconsfield, pp. 655–667.
7. Knauf G and Hopkins P: The EPRG guidelines on the assessment of defects in transmission pipeline girth welds. 3R International 1996, 35(10/11), p. 620–4.
8. Lanchakov G.A., Zorin Ye.Ye., Pashkov, YU.I., Stepanenko A.I. Rabotosposobnost' truboprovodov: v 3-kh ch. // CH. 2. Soprotivlyayemost' razrusheniyu. – Moscow: Nedra-Biznestsentr, 2001. – 350 p.

Поступила (received) 15.09.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Касьяненко Игорь Викторович (Касьяненко Ігор Вікторович, Kasyanenko Igor Victorovich) – аспирант, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», аспирант кафедры сварки г. Харьков, Украина; e-mail: igorkasyanen@gmail.com.

УДК 621.785.5: 621.793.6

*I. V. KRUGLYAK, B. B. KHINA, G. G. GORANSKIY***OBTAINING COMPLEX DIFFUSION LAYERS USING COMPOSITE SATURATING ENVIRONMENT**

The process of obtaining aluminum, titanium, siliconized, nickel layers is an effective method to increase the reliability and durability of machine parts, tools by creating protective layers on the surface of workpieces with a unique set of physico-chemical properties. One of the most effective methods for producing diffusion layers, which have high mechanical, physical, and chemical characteristics, is diffuse saturation of the surface of metals using composite saturating environments.

The large amount of theoretical and experimental material based on the use of precision methods for studying the phase and chemical composition of a diffusion layer allows us to state that in many cases of the chemical-thermal treatment of the formation of a diffusion layer it does not obey equilibrium conditions, but proceeds intermittently and can begin with the formation of a higher phase or medium composition. The structure of the diffusion layer in this case is not equilibrium. Among the various factors influencing the mechanism of formation of a diffusion layer with an uneven structure, the main ones are the initial conditions preceding the process of diffusion of elements into a metal, directly or indirectly depend on a number of physicochemical and kinetic factors of saturation, especially significant when it comes to compositional saturating environment presented in this study.

Copper-based alloys served as initial data for the study. Based on the analysis of the requirements for the layer and the selected method of saturation of the metal to obtain a diffusion layer, the method of diffusion of surface saturation from a solid phase in an active gas medium is selected. This method provides high surface quality, and it is the simplest and most effective in laboratory practice, is well reproduced in a production environment, and it does not require special sophisticated equipment, realizing it.

Keywords: composite saturating environment, thermodynamics, diffusion, diffusion layers, titanium, aluminum, silicon, nickel.

*I. В. КРУГЛЯК, Б. Б. ХИНА, Г. Г. ГОРАНСЬКИЙ***ОТРИМАННЯ КОМПЛЕКСНИХ ДИФУЗІЙНИХ ШАРІВ
З ВИКОРИСТАННЯМ КОМПОЗИЦІЙНИХ НАСИЧУЮЧИХ СЕРЕДОВИЩ**

Процес отримання алюмінієвих, титанових, силіційованих, нікельованих шарів є ефективним методом підвищення надійності та довговічності деталей машин, інструментів за рахунок створення захисних шарів на поверхні оброблюваних деталей, які мають унікальний набір фізико-хімічних властивостей. Одним з найбільш ефективних методів отримання дифузійних шарів, які володіють високими механічними, фізичними та хімічними характеристиками, є дифузійне насичення поверхні металів із застосуванням композиційних насичуючих середовищ.

Найвний великий теоретичний і експериментальний матеріал, який ґрунтується на застосуванні прецизійних методів дослідження фазового і хімічного складів дифузійного шару, дозволяє стверджувати, що у багатьох випадках практики хіміко-термічної обробки утворення дифузійного шару не підкоряється рівноважним умовам, а протікає переривчасто і може розпочатися з утворення фази вищого або середнього складу. Структура дифузійного шару в цьому випадку не є рівноважною. Серед різних чинників, що впливають на механізм формування дифузійного шару з нерівномірною структурою, головними є початкові умови, передуючі процесу дифузії елементів у метал, які прямо або побічно залежать від ряду фізико-хімічних і кінетичних чинників насичення, особливо значимих, якщо йдеться про композиційне насичуюче середовище, представлене в цьому дослідженні.

Сплави на основі міді служили вихідними даними для вивчення. На основі аналізу вимог до шару та обраного способу насичення металу для отримання дифузійного шару обрано метод дифузії насичення поверхні від твердої фази в активному газовому середовищі. Цей метод забезпечує високу якість поверхні, і він є найпростішим і найбільш дієвим у лабораторній практиці, добре відтворюється у виробничих умовах, і він не вимагає спеціального складного обладнання, реалізуючи його.

Ключові слова: композиційні насичуючі середовища, термодинаміка, дифузія, дифузійні шари, титан, алюміній, кремній, нікель.

*I. В. КРУГЛЯК, Б. Б. ХИНА, Г. Г. ГОРАНСКИЙ***ПОЛУЧЕНИЕ КОМПЛЕКСНЫХ ДИФФУЗИОННЫХ СЛОЕВ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМПОЗИЦИОННЫХ НАСЫЩАЮЩИХ СРЕД**

Процесс получения алюминиевых, титановых, силицированных, никелевых слоев является эффективным методом повышения надежности и долговечности деталей машин, инструментов за счет создания защитных слоев на поверхности обрабатываемых деталей, имеющих уникальный набор физико-химических свойств. Одним из наиболее эффективных методов получения диффузионных слоев, которые обладают высокими механическими, физическими и химическими характеристиками, является диффузное насыщение поверхности металлов с применением композиционных насыщающих сред.

Имеющийся большой теоретический и экспериментальный материал, основанный на применении прецизионных методов исследования фазового и химического состава диффузионного слоя, позволяет утверждать, что во многих случаях практики химико-термической обработки образования диффузионного слоя не подчиняется равновесным условиям, а протекает прерывисто и может начаться с образования фазы высшего или среднего состава. Структура диффузионного слоя в этом случае не является равновесной. Среди различных факторов, влияющих на механизм формирования диффузионного слоя с неравномерной структурой, главными являются начальные условия, предшествующие процессу диффузии элементов в металл, прямо или косвенно зависят от ряда физико-химических и кинетических факторов насыщения, особенно значимых, если речь идет о композиционных насыщающих средах, представленных в этом исследовании.

Сплавы на основе меди служили исходными данными для изучения. На основе анализа требований к слою и выбранного способа насыщения металла, для получения диффузионного слоя, выбран метод диффузии насыщения поверхности из твердой фазы в активной газовой среде. Этот метод обеспечивает высокое качество поверхности, и он является самым простым и наиболее действенным в лабораторной практике, хорошо воспроизводится в производственных условиях, и он не требует специального сложного оборудования, реализуя его.

Ключевые слова: композиционные насыщающие среды, термодинамика, диффузия, диффузные слои, титан, алюминий, кремний, никель.

Introduction. The choice of node construction material details development of friction while trying to get high performance characteristics is one of the base problems in machine building. The main aim is a selecting

known and creating new materials, possessing optimum characteristics, providing necessary resources for a given node development of friction. Alongside with getting necessary working characteristics it is required to take into

© I.V. Kruglyak, B.B. Khina, G.G. Goranski, 2019

account the economic considerations minding market conditions.

In this connection it's important that for node material development of friction to be obtained from available undeficit components using technology, requiring standard equipment, high vacuum, cryogenic temperatures and expensive technologies.

While selecting node material development of friction it must be taken account their compatibility, especially it's property of dripping and the following edge fin those are connected with chemical affinity, proximity to constitution and value of parameter of crystal lattices. In more general form compatibility is understood as the ability of materials to provide the optimum parameters of the node of friction at continuous exploitation, quickly adaptation to abrupt changes of the load, velocity and temperature under adverse conditions of lubricant.

Analysis of recent research and publications. In the article Kukhareva N.G., Galynska N.A., Petrovich S.N. [1], when considering the process of forming diffusion layers, usually attempt to trace this process using alloy state diagrams. At the same time, they proceed from the position that has become almost the rule that the formation of a layer on the diffusion isotherm follows an increase in the concentration of the diffusing element in the alloy system and obeys the laws of phase transformations. In this case, first the phases of the lower composition must occur, then the middle and finally the higher (pure or atomic diffusion theory) [1]. According to another theory (reaction diffusion theory), the formation of a diffusion layer can begin with the formation of a phase of higher or medium composition, past the stage of formation of a phase of the lower composition, if the thermodynamic conditions for the formation of these phases are more favorable than for the phases of the lower composition [1].

The large theoretical and experimental material available [2–8], which is based on the application of precision methods for the study of the phase and chemical compositions of the diffusion layer, convinces us that in many cases the practice of chemical-thermal treatment of the formation of the diffusion layer does not obey equilibrium conditions, intermittent and may begin with the formation of the phase of higher or middle composition. In this case, the structure of the diffusion layer is not equilibrium. Among the various factors affecting the mechanism of formation of a diffusion layer with non-equilibrium structure, the main ones are the initial conditions preceding the process of diffusion of elements into metal, which directly or indirectly depend on a number of physicochemical and kinetic saturation factors, especially significant when it comes to a multicomponent system the saturation presented in this study.

With the emergence of the theory of nonequilibrium systems, it became possible to influence the structure and properties of diffusion layers by changing the dynamics of the saturation process itself. By changing the composition of the saturating medium and the ratio of its components, it is possible to influence the system and thereby change the kinetics of the diffusion processes.

The article [9] found that for room temperature the values of the chemical potential (the intersection of the solid line with the vertical axis) and the partial molar

enthalpy of iron (the intersection of the dashed line with the vertical axis), which are calculated by the Miedema model for the amorphous alloy of the above composition, differ significantly from values determined on the basis of experimental data (see the icons on the vertical axis). This is due to the fact that the semi-empirical model of Miedema is intended to estimate only the integral quantity (the excess enthalpy of mixing in the amorphous phase), and, due to its structure, is not suitable for estimating partial molar quantities. In addition, since the amorphous alloy was obtained by attritor treatment, the experimentally determined values of μ_{Fe} and h_{Fe} [10] include the stored deformation energy attributable to Fe (alloy base). In the Miedema model, the contribution of the stored strain energy is not taken into account.

Presenting main material. In diffusion saturation, it is important to transfer the components to the surface through the saturated gas phase. Obtaining protective coatings is carried out under non-stationary temperature conditions, so chemical transport reactions are important.

Mechanical compression tests show that the role of the diffusion layer is not only limited by the surface protection functions of the specimens, but also has a significant effect on its bulk properties. Diffusion saturation of titanium and aluminum alloys increases the compressive strength by 52%.

The high propagation velocities of the combustion wave, together with the high temperature, determine the short synthesis times and high process performance. Typical linear combustion velocities are 0.5–5 cm / sec., and in some cases they can reach large values (up to 20 cm / sec.). Often, the synthesis reaction does not have time to complete in the wave itself, and a volumetric reaction and formation of the final structure of products behind the combustion front take place. But also such process proceeds quickly enough because of high combustion temperatures.

Copper alloys protection with their chemist-thermal processing appears to be not only perspective, but sometimes the only possible way of the obtaining product having necessary complex working characteristics, with enlarged mechanical toughness, corrosion to stability, resistances to detritions and oxidation under high temperature while keeping main copper alloy quality that is high electrical and thermal conductivity. Saturation to surfaces alloys simultaneously with several elements has main the advantage it allows to obtain, as a rule, more essential improvement of characteristic surface layer [11].

On analysis reaction observation, taking place while chemical-thermal processing in mode of the heat spontaneous combustion of powdered mixture, as well as the results of experiments and metallographic examination, there has been got the scheme of the formation hardened layers on copper alloys. It is possible to divide this process into several stages conditionally. First, the reactionary mixture is warmed in a stove up to the temperature of ignition that is it passes so called stage of the inert heating. Then occurs the interaction between powder oxides chromium, aluminum, as well as molybdenum, aluminum and silicon, occurs at the same time temperature in a reactor increases up to a maximum value. It is a stage of the heat spontaneous combustion.

On the third stage – the stage of heating product if occurs leveling the temperature over the volume of the reactor. At this chase active atoms of silicon, molybdenum and the other elements begin diffuse into a substrate. On the following stage, the stage of isothermal endurances – further diffusion a growing of the covering occurs.

As a result of diffusion surface saturation in condition of self-propagation high-temperature synthesis alumina-silicon, titanium-silicon and alumina-molybdenum-silicon covering on copper alloy were obtained. Herewith, the maximum thickness covering was 10–65 μm . The measurement of the geometric sizes of samples were conducted before and after the chemical-thermal processing.

The differences in quality of surfaces, as structure, phase, composition, micro hardness and contents doping elements in diffusion layer on alloys are defined by the temperature of the process, the time of the endurance and the composite saturating environment. The mode of the heat spontaneous combustion, characterized by small duration, is recommended to use instead of traditional ways of chemical-thermal processing alloys (nitration, chrome plating and others).

Structure x-rays analysis has shown that except α -hard solution aluminum and nickel in alloy on base copper in diffusion layer there are following phases Cu_9Al_4 , NiAl , Ni_3Al . Stabildross of samples saturated with aluminum, silicon and nickel simultaneously, in many times exceeds the resistance to oxidation of the uncovered alloy. So, when testing during 12 ch weight up of diffusion-saturated samples is 6 times less. Microstructure of a diffusion layer after testing keeps column extended grain α -phases and a number of mechanical mixture phases, but the general depth of a layer is somewhat bigger. Presence refractory chemical compounds in diffusion layer such as NiAl , must promote increasing hot-resistance sample [12].

The influence of diffusion saturation aluminum, silicon and nickel on wear capability copper alloy was defined on a universal machine MI-1M in condition of dry friction and the swing under load 25 kg [13]. The following conditions of friction were accepted, meeting the usage terms of the nodes: $V = 1,5 \text{ m/s}$, $P = 0,8 \text{ MPa}$. The behavior of diffusion-saturated sample in condition of the wear-out test has shown perspectives of dopins surface as a method of increasing alloy wear capability. It gave possibility for normal working conditions of mechanism optimum thickness of the defensive covering on details, being subjected to wearing out is 0,02–0,09 mm. Using of mechanical tests on compression it is proved that the role of diffusion layer is not limited only a function of surfaces sample protection, but it influences essentially three-dimensional characteristics. Diffusion saturation of alloy aluminum and nickel raises the limit to toughness at compression of 52%.

Consequently, diffusion saturation alloy aluminum and nickel raises such characteristics of bronze and brasses, as stabildross, wear-out resistance and mechanical toughness, and can be used in the industry aiming increase of reliability and longevity of a copper product.

Research of reliability of mechanisms is proved in most cases quick wear-out of the details, made from bronze (the bushings, anything numbered six), occurs because of

roughness of the associate detail. Most wear-out of the bronze details occurs at period of the wear-in, during which value break-in wear-out can form 60–70% general tolerance for wear-out.

Research of the influence of the nickel covering on a wear-out sample ($V = 2,5 \text{ m/s}$, $P = 1,0 \text{ MPa}$) were made on installation for test material on detritions. As rear body was used the bar from fast-cut steel R6M5, hardened to hardness HRC 62–65. To two parties samples of 10 pieces each were subjected to the test: the first party was without covering, the second was with nickel and silicon covering by thickness 10–65 μm . It was accepted that for criterion of the wear-out the ability process surfaces to exercised sample to resist to detrition, which was valued with a gap of time from the beginning of test before appearance of hits on diagram tape grapher, caused by process of grasp a material sample and rear body.

Conclusions. As a result of physico-chemical modeling, it is established that the process of obtaining protective coatings is possible only if the solubility of the diffusing element in the metal and a sufficiently high temperature that provides the necessary energy to the atoms. The possibility of chemical transport in the combustion wave is based on the fact that in the combustion process there is a consistent change of temperature modes and the temperature at each point of the mixture runs a series of continuous values from T_0 to T_g . Thus, a non-stationary temperature process combined with chemical transport reactions can be used to obtain coatings.

Using nickel saturation of allows in 1,4–1,8 times raises wear capability a sample in consequence of reduction of the factor of friction. Herewith improve the steady-state factors to resistivity of the surfaces sample to detritions. The Analysis shows that using on sample of the nickel covering promotes increasing to reliability of the product as a whole. Thereby, executed studies point to perspective using silicon saturation and nickel saturation as a efficient tribotechnical covering. Herewith in process of the mechanical processing the details of the nodes of friction it is necessary to provide allow to come near for thickness of the inflicted covering.

References (transliterated)

1. Kukhareva N.G. Investigation of the physicommechanical properties of boride coatings on carbon steels / N.G. Kukhareva, N.A. Galynskaya, S.N. Petrovich // Science – education, production, economics: materials of the 11th International Scientific and Technical Conference. Vol. 1. – Minsk: BNTU. – 2013. – P. 371.
2. Kukhareva N.G. Boroning of carbon and alloy steels in a fluidized bed / N.G. Kukhareva, S.N. Petrovich, N.A. Galynskaya, V.F. Protasevich, T.N. Smirnova // Science and technology: international scientific and technical. – 2012. – No.5. – P. 8–12.
3. Kukhareva N.G. The influence of thermal diffusion carbonitration conditions and the structure of diffusion coatings on the mechanical properties of tool steel P6M5 / N.G. Kukhareva, S.N. Petrovich, N.A. Galynskaya // Bulletin of the Belarusian National Technical University: scientific and technical journal. – 2009. – No 4. – P. 25–29.
4. Galynskaya N.A. Study of the wear resistance of boride coatings obtained from composite powder media / N.A. Galynskaya, N.G. Kukhareva, S.N. Petrovich, T. Babul, Z. Obukhovich // Science and technology: international scientific and technical journal. – 2012. – No. 1. – P. 10–16/
5. Galynskaya N.A. Features of the technology for complex diffusion coatings based on boron and chromium / N.A. Galynskaya // Prospects for the development of surface and volume hardening of

- alloys: a collection of scientific papers dedicated to the 40th anniversary of the Department of "Materials Science in Mechanical Engineering" / ed. Voroshnina L.G.; BNTU. Minsk, 2004. – P. 48–52.
6. Galynskaya N.A. Features of the formation of boride coatings from composite metallothermal powder media / N.A. Galynskaya, N.G. Kukhareva, V.S. Niss, S.N. Petrovich // Bulletin of the Belarusian National Technical University: scientific and technical journal. – 2011. – No. 4. – P. 15–20.
 7. Galynskaya N.A. Comparative analysis of the characteristics of diffusion layers obtained in a "fluidized bed" and with traditional furnace heating / N.A. Galynskaya, G.V. Stasevich // Science – education, production, economics: materials of the 11th International Scientific and Technical Conference. Vol. 1. – Minsk: BNTU, 2013. – P. 372.
 8. Galynskaya N.A. Hardening processing of dies for deep drawing / N.A. Galynskaya, N.G. Kukhareva, S.N. Petrovich, G.V. Stasevich // Bulletin of the Belarusian National Technical University: scientific and technical journal. 2010. – No. 4. – P. 30–34.
 9. B.B. Hina, G.G. Goransky, B.P. Sereda. An analysis of the applicability of the semi-empirical model of the mededema to the description of the partial thermodynamic characteristics of a multicomponent amorphous iron-based alloy. // Mathematical modeling. – No.1 (40) – 2019. – P. 83–89.
 10. Goransky G.G., Hina B.B. Analysis of the thermodynamic characteristics of a multicomponent amorphous alloy based on iron: an experimental study and theoretical interpretation / G.G. Goransky, B.B. Hina // Mathematical modeling. – 2018. – P. 201–205.
 11. B. Sereda, A. Zherebtsov, Y. Belokon'. The Modeling and Processes Research of Titan Aluminides Structurization Received by SHS Technology. TSM International 2010. Seattle. USA 2010. – P. 275.
 12. B. Sereda, S. Sheyko Influence of preliminary preparation of surface on adhesive durability of coverings received in self-propagating high-temperature synthesis conditions. 10th International Conference on the Science and Technology of Adhesion and Adhesives. – Oxford, UK, 2008. P. 433–436.
 13. B. Sereda, I. Kruglyak, S. Sheyko. The Reception of Borized Coatings Eutectic Type on Steel in SHS-Conditions. MST&T'08. 2008. P. 1884 – 1889.
 - Н.А. Гальнская // Вестник Белорусского национального технического университета: научно-технический журнал. – 2009. – № 4. – С. 25–29.
 4. Гальнская Н.А. Исследование износостойкости боридных покрытий, полученных из композиционных порошковых сред / Н.А. Гальнская, Н.Г. Кухарева, С.Н. Петрович, Т. Бабуль, З. Обухович // Наука и техника: международный научно-технический журнал. – 2012. – № 1. – С. 10–16
 5. Гальнская Н.А. Особенности технологии получения комплексных диффузионных покрытий на основе бора и хрома / Н.А. Гальнская // Перспективы развития поверхностного и объемного упрочнения сплавов: сборник научных трудов, посвященный 40-летию кафедры «Материаловедение в машиностроении» / под ред. Ворошнина Л. Г.; БНТУ. Минск, 2004. – С. 48–52.
 6. Гальнская Н.А. Особенности формирования боридных покрытий из композиционных металлургических порошковых сред / Н.А. Гальнская, Н.Г. Кухарева, В.С. Нисс, С.Н. Петрович // Вестник Белорусского национального технического университета: научно-технический журнал. – 2011. – №4. – С. 15–20.
 7. Гальнская Н.А. Сравнительный анализ характеристик диффузионных слоев, полученных в «кипящем» слое и при традиционном печном нагреве / Н.А. Гальнская, Г.В. Стасевич // Наука – образованию, производству, экономике: материалы 11-й Международной научно-технической конференции. Т. 1. – Минск: БНТУ, 2013. – С. 372.
 8. Гальнская Н.А. Упрочняющая обработка штампов для глубокой вытяжки / Н.А. Гальнская, Н.Г. Кухарева, С.Н. Петрович, Г.В. Стасевич // Вестник Белорусского национального технического университета: научно-технический журнал. 2010. – №4. – С. 30–34.
 9. Б.Б. Хина, Г.Г. Горанский, Б.П. Серeda. Анализ применимости полумпирической модели миедмы к описанию парциальных термодинамических характеристик многокомпонентного аморфного сплава на основе железа. // Математичне моделювання. – № 1(40) – 2019. – С. 83–89.
 10. Горанский Г.Г., Хина Б.Б. Анализ термодинамических характеристик многокомпонентного аморфного сплава на основе железа: экспериментальное исследование и теоретическая интерпретация / Г.Г. Горанский, Б.Б. Хина // Математическое моделирование. – 2018. – С. 201–205.
 11. B. Sereda, A. Zherebtsov, Y. Belokon'. The Modeling and Processes Research of Titan Aluminides Structurization Received by SHS Technology. TSM International 2010. Seattle. USA 2010. – P. 275.
 12. B. Sereda, S. Sheyko Influence of preliminary preparation of surface on adhesive durability of coverings received in self-propagating high-temperature synthesis conditions. 10th International Conference on the Science and Technology of Adhesion and Adhesives. – Oxford, UK, 2008. P. 433–436.
 13. B. Sereda, I. Kruglyak, S. Sheyko. The Reception of Borized Coatings Eutectic Type on Steel in SHS-Conditions. MST&T'08. 2008. p. 1884 – 1889.

Саисок літэратуры

1. Кухарева Н.Г. Исследование физико-механических свойств боридных покрытий на углеродистых сталях / Н. Г. Кухарева, Н. А. Гальнская, С. Н. Петрович // Наука – образованию, производству, экономике: материалы 11-й Международной научно-технической конференции. Т. 1. – Минск: БНТУ. – 2013. – С. 371.
2. Кухарева Н.Г. Борирование углеродистых и легированных сталей в кипящем слое / Н.Г. Кухарева, С.Н. Петрович, Н.А. Гальнская, В.Ф. Протасевич, Т. Н. Смирнова // Наука и техника: международный научно-технический журнал. – 2012. – № 5. – С. 8–12.
3. Кухарева Н.Г. Влияние условий термодиффузионной карбонитрации и структуры диффузионных покрытий на механические свойства инструментальной стали Р6М5 / Н.Г. Кухарева, С.Н. Петрович, И.А. Гальнская // Вестник Белорусского национального технического университета: научно-технический журнал. – 2009. – № 4. – С. 25–29.
4. Гальнская Н.А. Исследование износостойкости боридных покрытий, полученных из композиционных порошковых сред / Н.А. Гальнская, Н.Г. Кухарева, С.Н. Петрович, Т. Бабуль, З. Обухович // Наука и техника: международный научно-технический журнал. – 2012. – № 1. – С. 10–16
5. Гальнская Н.А. Особенности технологии получения комплексных диффузионных покрытий на основе бора и хрома / Н.А. Гальнская // Перспективы развития поверхностного и объемного упрочнения сплавов: сборник научных трудов, посвященный 40-летию кафедры «Материаловедение в машиностроении» / под ред. Ворошнина Л. Г.; БНТУ. Минск, 2004. – С. 48–52.
6. Гальнская Н.А. Особенности формирования боридных покрытий из композиционных металлургических порошковых сред / Н.А. Гальнская, Н.Г. Кухарева, В.С. Нисс, С.Н. Петрович // Вестник Белорусского национального технического университета: научно-технический журнал. – 2011. – №4. – С. 15–20.
7. Гальнская Н.А. Сравнительный анализ характеристик диффузионных слоев, полученных в «кипящем» слое и при традиционном печном нагреве / Н.А. Гальнская, Г.В. Стасевич // Наука – образованию, производству, экономике: материалы 11-й Международной научно-технической конференции. Т. 1. – Минск: БНТУ, 2013. – С. 372.
8. Гальнская Н.А. Упрочняющая обработка штампов для глубокой вытяжки / Н.А. Гальнская, Н.Г. Кухарева, С.Н. Петрович, Г.В. Стасевич // Вестник Белорусского национального технического университета: научно-технический журнал. 2010. – №4. – С. 30–34.
9. Б.Б. Хина, Г.Г. Горанский, Б.П. Серeda. Анализ применимости полумпирической модели миедмы к описанию парциальных термодинамических характеристик многокомпонентного аморфного сплава на основе железа. // Математичне моделювання. – № 1(40) – 2019. – С. 83–89.
10. Горанский Г.Г., Хина Б.Б. Анализ термодинамических характеристик многокомпонентного аморфного сплава на основе железа: экспериментальное исследование и теоретическая интерпретация / Г.Г. Горанский, Б.Б. Хина // Математическое моделирование. – 2018. – С. 201–205.
11. B. Sereda, A. Zherebtsov, Y. Belokon'. The Modeling and Processes Research of Titan Aluminides Structurization Received by SHS Technology. TSM International 2010. Seattle. USA 2010. – P. 275.
12. B. Sereda, S. Sheyko Influence of preliminary preparation of surface on adhesive durability of coverings received in self-propagating high-temperature synthesis conditions. 10th International Conference on the Science and Technology of Adhesion and Adhesives. – Oxford, UK, 2008. P. 433–436.
13. B. Sereda, I. Kruglyak, S. Sheyko. The Reception of Borized Coatings Eutectic Type on Steel in SHS-Conditions. MST&T'08. 2008. p. 1884 – 1889.

Надійшла (received) 10.11.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

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

Хина Борис Борисович (Хина Борис Борисович, Khina Boris Borisovich) – доктор фіз.-мат. наук, доцент, головний науковий співробітник, Фізико-технічний інститут НАН Білорусі, м. Мінськ

Горанський Георгій Георгійович (Горанський Георгий Георгиевич, Goranskiy Georgy Georgievich) – кандидат технічних наук, провідний науковий співробітник, Науково-технологічний парк "Політехнік", Білоруський Національний технічний університет, м. Мінськ

УДК 621.771.23:681.5.015.2

*О. Г. КУРПЕ, В. В. КУХАР***ВДОСКОНАЛЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ЗМІНИ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ СМУГИ ПЕРЕД ТЕРМОМЕХАНІЧНОЮ ПРОКАТКОЮ НА СТАНІ СТЕККЕЛЯ**

В роботі вдосконалено математичну модель зміни температурного поля смуги перед термомеханічною прокаткою та виконані розрахунки для умов стану Стеккеля. Вдосконалення моделі здійснено за рахунок врахування впливу конвекційного теплового потоку. Моделювання процесу зміни температурного поля здійснено для умов охолодження смуги розмірами 40x1510 мм зі сталі марки Х65, відповідно до вимог стандарту API-5L, що була нагрітою до температури 825 °С в пічній моталці, з метою подальшої прокатки на стані Стеккеля. По результатах моделювання встановлено, що більш інтенсивне охолодження спостерігається на бокових кромках смуги. Для мінімізації впливу на механічні властивості смуги більш охолоджених бокових кромок запропоновані варіанти підвищення температури при нагріванні, шляхом перерозподілу температури в пічному просторі, або її збереження перед прокаткою на стані. Виконано оцінку впливу конвекції при моделюванні зміни розподілу температури смуги по ширині по режимах термомеханічної прокатки в діапазоні технологічних температур 800-825 °С, вплив конвекції становить 93%. В порівнянні з режимами гарячої прокатки, в діапазоні технологічних температур 1050-1100 °С, вплив конвекції становить 1%, що підтверджує доцільність виконаної розробки. Вдосконалену модель можливо використовувати для розрахунків зміни розподілу температури плоского прокату, який виробляється по режимах гарячої прокатки, термомеханічної прокатки та її різноманітних варіантів реалізації (високотемпературної та низькотемпературної), а також нормалізуючої прокатки.

Ключові слова: математична модель, температурне поле, конвекційний тепловий потік, термомеханічна прокатка, стан Стеккеля.

*А. Г. КУРПЕ, В. В. КУХАРЬ***СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ПОЛОСЫ ПЕРЕД ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ПРОКАТКОЙ НА СТАНЕ СТЕККЕЛЯ**

В работе усовершенствована математическая модель изменения температурного поля полосы перед термомеханической прокаткой и выполнены расчеты для условий стана Стеккеля. Совершенствование модели выполнено за счет учета влияния конвекционного теплового потока. Моделирование процесса изменения температурного поля реализовано для условий охлаждения полосы размерами 40x1510 мм из стали марки Х65, в соответствии с требованиями стандарта API-5L, которая была нагрета до температуры 825 °С в печной моталке, с целью дальнейшей прокатки на стане Стеккеля. По результатам моделирования установлено, что более интенсивное охлаждение наблюдается на боковых кромках полосы. Для минимизации влияния на механические свойства полосы более охлажденных боковых кромок предложены варианты повышения температуры при нагревании, путем перераспределения температуры в печном пространстве, или ее сохранения перед прокаткой на стане. Выполнена оценка влияния конвекции при моделировании изменения распределения температуры полосы по ширине по режимам термомеханической прокатки в диапазоне технологических температур 800-825 °С, влияние конвекции составляет 93%. По сравнению с режимами горячей прокатки, в диапазоне технологических температур 1050-1100 °С, влияние конвекции составляет 1%, что подтверждает целесообразность выполненной разработки. Усовершенствованную модель возможно использовать для расчетов изменения распределения температуры плоского проката, который производится по режимам горячей прокатки, термомеханической прокатки и ее различных вариантов реализации (высокотемпературной и низкотемпературной), а также нормализующей прокатки.

Ключевые слова: математическая модель, температурное поле, конвекционный тепловой поток, термомеханическая прокатка, стан Стеккеля.

*О. Н. КУРПЕ, В. В. КУХАР***REFINEMENT OF THE MATHEMATICAL MODEL OF STRIP TEMPERATURE FIELD CHANGE BEFORE THE THERMOMECHANICAL ROLLING AT THE STECKEL MILL**

In the paper the mathematical model of strip temperature field change before the thermomechanical rolling has been refined and the calculations have been performed for the Steckel rolling mill conditions. The refinement of the model has been performed due to the accounting of the influence of the thermal-convection current. The simulation of the temperature field change process has been performed for conditions of strip cooling with dimensions 40x1510 mm produced of steel grade X65, in accordance with API-5L standard requirements. The strip has been heated to up to 825 °С in the furnace coiler for further rolling at the Steckel mill. Subsequent to the results of modelling there has been determined that the more enhanced cooling has been observed on the side edges of the strip. For minimization of more cooled side edges impact on the strip mechanical properties the options of the temperature raise have been offered at heating, by means of temperature distribution within the furnace area, or the temperature conservation before rolling at the mill. There has been carried out the evaluation of the convection influence when modelling the change of the strip temperature distribution along the width within the thermomechanical rolling patterns in the range of technological temperatures 800-825 °С. The convection influence constitutes 93%. In comparison to hot rolling patterns, the convection influence constitutes 1% in the range of the technological temperatures 1050-1100 °С. This fact supports the appropriateness on the performed development. The refined model can be applied for calculations of temperature distribution change for flat-rolled products that are produced under the hot rolling schedule, thermomechanical rolling schedule and of its various types of implementation (high temperature and low temperature) and also normalized rolling.

Key words: mathematical model, temperature field, thermal-convection current, thermomechanical rolling, Steckel mill.

Вступ. Розвиток обчислювальної техніки спонукав поширенню досліджень, що виконуються методами математичного моделювання. Ці методи дозволяють поглибити існуючі знання про фізичні процеси металургії та розробити превентивні методи впливу на кінцевий результат. Тенденція з

дослідження, у тому числі, процесів обробки металів тиском через їх математичне моделювання замість існуючих аналітичних залежностей, у більшості випадків, є науковою тенденцією, що відкриває нові можливості для проектування обладнання та нового рівня технології.

© О. Г. Курпе, В. В. Кухар, 2019

Аналіз стану питання. Найбільш сучасною та наукоємною технологією обробки металів тиском на теперішній час є технологія термомеханічної обробки, або термомеханічної прокатки (“thermo-mechanical control process”, далі ТМСР). Ця технологія поглиблено вивчається та вдосконалюється більш ніж останні 30 років, одночасно з вдосконаленням відповідного промислового та випробувального устаткування [1-4].

Поміж тим, вивчення технології ТМСР методами математичного моделювання дозволяє отримати більше важелів для її тонкого керування.

Так, відомо, що при термомеханічній прокатці великий вплив на отримання кінцевих механічних властивостей має дотримання необхідної технологічної температури перед початком аустенітного перетворення, а також мінімізація коливань температури по ширині та довжині прокату [5-9]. Поглиблене вивчення температурних процесів, які відбуваються при обробці металів тиском через математичне моделювання, серед інших наведено в роботах авторів [10-13]. Особливу цікавість представляє робота [10], в якій автори вивчають змінення температури одночасно з фазовим перетворенням при охолодженні в процесі змотування рулону. В роботі [11] автори вивчають вплив температурних полів та теплових потоків на форму смуги, з можливістю керування в режимі реального часу. Вплив температурних полів на дефекти форми смуги автори роботи [12] вивчають зворотнім тримірним методом. Слід зазначити, що в цих роботах нахил вивчення зроблено на широкий діапазон змінення температур гарячої прокатки, в той час як технологія ТМСР має вузький температурний коридор, що потребує окремого додаткового вивчення.

Мета роботи. Метою дослідження є пошук такої форми температурного поля, яке повинен мати підкат по ширині після нагрівання, щоб безпосередньо перед прокаткою, яку проводять в кліті Стеккеля, він мав необхідний градієнт розподілу температур.

Основна частина. Відповідно до сучасного уявлення теорії теплопереносу, передача тепла від тіл які нагріті вище температури червоного світіння, відбувається головним чином випромінюванням. Вплив конвекційного механізму теплопередачі зі зниженням температури поверхні заготовки збільшується.

Особливістю стану Стеккіля є те, що впродовж процесу прокатки температуру можна утримувати на необхідному рівні завдяки наявності двох пічних моталок, тобто на рівні, необхідному для здійснення термомеханічного процесу. Тому, при розрахунку процесу ТМСР, враховували теплопередачу випромінюванням та конвекцією.

Відома математична модель зміни температурного поля нерівномірно нагрітої смуги що охолоджується [13], яка включає залежності для розрахунку температури довільного проміжного (і-го) шару заготовки, шару з максимальною теплоємністю та шару на кромці, доповнена врахуванням конвекційного теплового потоку, відповідно до закона

Ньютона-Рихмана:

$$\partial Q = \alpha (t - t_{o,c}) \cdot \partial F \cdot \partial \tau, \quad (1)$$

де t – температура смуги, оС;

$t_{o,c}$ – температура довкілля, оС;

α – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²·К);

∂F – елементарна площа перерізу, нормально до якій проходить тепловий потік;

$\partial \tau$ – елементарний проміжок часу.

Після врахування залежності (1), математична модель для розрахунку температури довільного проміжного (і – го) шару заготовки (в проміжку часу $j - 1$) має наступний вигляд:

$$t_{i,j-1} = t_{i,j} + Fo_{\Delta x} (t_{i-1,j} - 2t_{i,j} + t_{i+1,j}) - Fo_{\Delta x} \times \frac{\sigma \cdot \Delta x^2}{\lambda \cdot B_0} \times \left[(t_{i,j} + 273)^4 - (293)^4 \right] - Fo_{\Delta x} \times \frac{\alpha \cdot \Delta x^2}{\lambda \cdot B_0} (t_{i,j} - 20), \quad (2)$$

де Δx – ширина елементарного об'єму шару, м;

$Fo_{\Delta x}$ – критерій Фур'є для елементарного об'єму шириною Δx , м;

σ – коефіцієнт випромінювання чорного тіла;

$B_{оп}$ – ширина смуги, м;

λ – коефіцієнт теплопровідності для матеріалу полоси при заданих умовах, Вт/м·град;

α – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²·К).

Критерій Фур'є розраховували по відомій залежності:

$$Fo_{\Delta x} = a_T \cdot \Delta \tau / \Delta x^2, \quad (3)$$

де a_T – коефіцієнт температуропровідності, м²/год;

$\Delta \tau$ – елементарний проміжок часу, год.

В свою чергу коефіцієнт температуропровідності a_T визначали по формулі:

$$a_T = \lambda / \rho_3 \cdot c, \quad (4)$$

де ρ_3 – щільність сталі, кг/м³;

c – середня теплоємність, кДж/(кг·К).

Вдосконалена модель також включає залежності для розрахунку фізичних та теплофізичних властивостей низьковуглецевих, або вуглецевих марок сталі, що є найбільш наближеними до марок, які використовуються в технології ТМСР, які отримані шляхом обробки даних робіт [14-16]. Для розрахунку цих властивостей розроблено по кілька залежностей для різних діапазонів температур, що забезпечило отримання коефіцієнту вірогідності апроксимації R^2 більш ніж 0,90.

Зокрема, для розрахунку коефіцієнту теплопровідності λ маловуглецевих сталей отримані залежності для двох діапазонів температур застосування:

для температури обробки сталі від 100 °С до 900 °С

$$\lambda = -0,0363t + 59,381. \quad (5)$$

для температури обробки сталі >900 °С до 1200 °С

$$\lambda = 20,848e^{0,0003t}. \quad (6)$$

Результати обробки даних для отримання залежностей (5) та (6) наведені на рис. 1

Для розрахунку середньої теплоємності вуглецевої сталі c отримані наступні залежності: для температури обробки сталі від 100 °С до 800 °С

$$c = 0,4556e^{0,0005t} \quad (7)$$

для температури обробки сталі >800 °С до 1300 °С

$$c = -3 \times 10^{-5}t + 0,7211 \quad (8)$$

Результати обробки даних для отримання залежностей (7) та (8) наведені на рис. 2

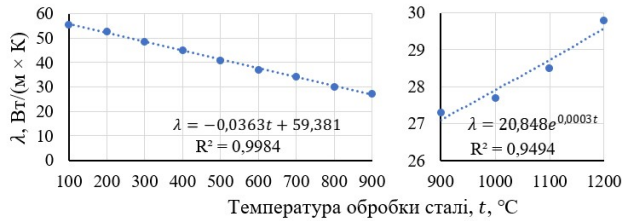


Рис. 1 – Визначення залежності теплопровідності λ від температури t

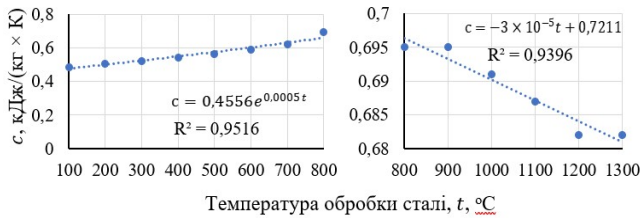


Рис. 2 – Визначення залежності теплоємності c від

температури t

Відомо, що при термомеханічній прокатці важливо мати розподіл температур, який не повинен перевищувати 25°С по ширині, що на кінцевій стадії обробці забезпечить мінімальну анізотропію механічних властивостей прокату.

Апробація розробленої математичної моделі з метою оцінки розподілу температур по ширині після нагрівання, перед термомеханічною прокаткою на стані Стеккеля, виконана при наступних умовах: матеріал смуги – сталь марки Х65 відповідно до вимог стандарту API-5L; розміри смуги: товщина – $h_0 = 40$ мм, ширина – $B_0 = 1510$ мм; температура нагрівання смуги в пічній моталці $t = 825$ °С; час між виходом смуги з пічної моталки до початка її прокатування становить 8 сек.

Хімічний склад сталі що використовувалась в дослідженні наведений в табл. 1.

Базовий розподіл температури смуги на половині ширини, після нагрівання в пічній моталці, який буде використовуватися для подальшого математичного моделювання, наведений в табл. 2.

Результати моделювання наведені на рис. 3.

По результатах моделювання, більш інтенсивне охолодження спостерігається на бокових кромках смуги.

Для мінімізації впливу на механічні властивості смуги більш охолоджених бокових кромки, необхідно скорегувати режим нагрівання зі зміною розподілу температур по перерізу пічної моталки, або встановити екранування бокових кромки між пічною моталкою та станом.

Таблиця 1 – Хімічний склад сталі що використовувалась в дослідженні

Марка сталі	Хімічний склад, %														
	C	Mn	Si	S	P	Al	Nb	V	Cu	Ni	Cr	Mo	Ti	N	B
X65	0,09	1,4	0,23	0,002	0,011	0,036	0,03	0,066	0,02	0,02	0,03	0,01	0,015	0,007	0,0005

Таблиця 2 – Базовий розподіл температури смуги на половині ширини

Показник	Значення показника										
	Відстань від кромки смуги, мм	75,5	151	226,5	302	377,5	453	528,5	604	679,5	755
Температура, °С	825	825	826	827	827	829	830	830	831	832	833

Для оцінка впливу конвекції на розподіл температури по ширині смуги, на підставі вдосконаленої математичної моделі, виконано розрахунок для умов гарячої та термомеханічної прокатки.

Вхідні дані, які були використані для розрахунків, наведені в табл. 3.

Результати оцінки впливу конвекції при моделюванні зміни температури смуги по двох

технологіях прокатки наведені на рис. 4.

По результатах моделювання та оцінки впливу конвекції отримані наступні результати:

– при реалізації режимів ТМСП в діапазоні температур 800°С – 825 °С, втрати тепла конвекцією на кромці смуги становлять 93%, тобто з загального зниження температури на кромці, яке становить 17,93 °С, зниження за рахунок конвекції становить 16,72 °С.

Таблиця 3 – Дані що використані при розрахунках по різних технологія

Технологія	Товщина смуги, мм	Ширина смуги, мм	Температура після пічної моталки, °C	Час охолодження смуги, сек
Гаряча прокатка	40	1400	1100	140
TMCP	40	1510	825	8

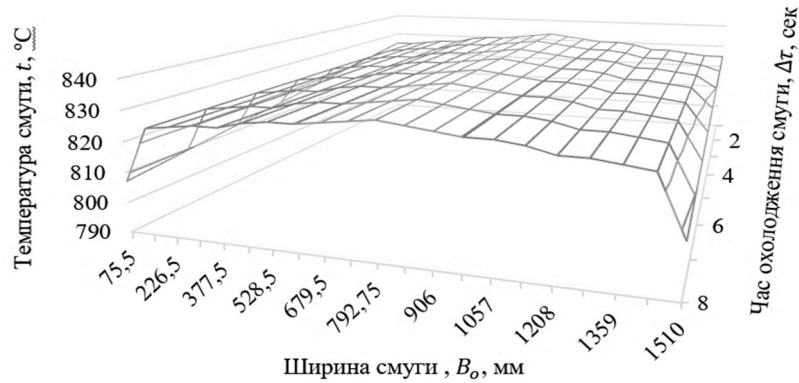


Рис. 3 – Результати моделювання розподілу температури смуги по режимах TMCP

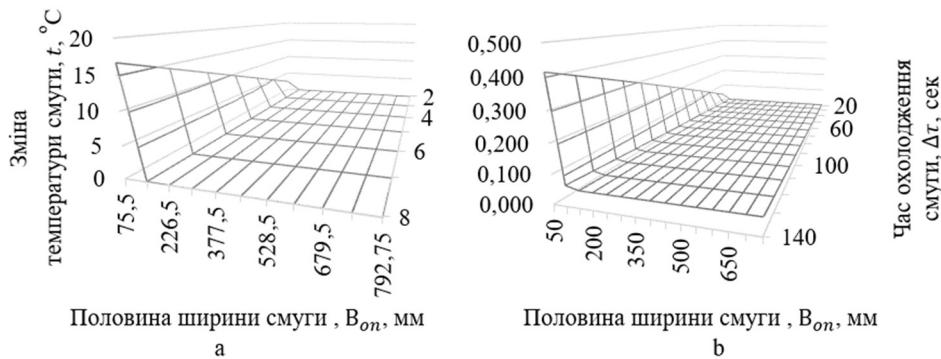


Рис. 4 – Результати оцінки впливу конвекції при моделюванні розподілу температури по ширині смуги: а – по режимах TMCP, б – та по режимах гарячої прокатки

Ближче до центру смуги вплив конвекції суттєво зменшується.

– при реалізації режимів гарячої прокатки в діапазоні температур 1050 °C – 1100 °C, втрати тепла конвекцією на кромці смуги становлять лише 1%, тобто з загального зниження температури на кромці, яке становить 41,69 °C, зниження за рахунок конвекції становить лише 0,42 °C.

Висновки. Вдосконалено математичну модель зміни розподілу температурного поля смуги по ширині за рахунок врахування конвекційного теплового потоку.

Виконано оцінку впливу конвекції при моделюванні зміни розподілу температури смуги по ширині по режимах TMCP, який становить 93%, тоді як по режимах гарячої прокатки, вплив конвекції становить лише 1%.

Встановлено, що більш інтенсивне охолодження спостерігається на бокових кромках смуги.

Запропоновано рішення для вирівнювання температури бокових кромки через корегування режиму нагрівання в пічній моталці або екранування.

Вдосконалену модель можливо використовувати для розрахунків зміни розподілу температури плоского прокату, який виробляється по режимах гарячої прокатки, термомеханічної прокатки та її різноманітних варіантів реалізації (високо температурної та низько температурної), а також нормалізуючої прокатки.

Список літератури

- Zinchenko Yu. A. Kurpe A. G., Bagmet O. A. Prospects of the technology used to make skelp at the Azovstal metallurgical combine, *Metallurgist*, Vol. 52, Nos. 7–8, 2008. pp. 461–463, DOI: <https://doi.org/10.1007/s11015-008-9065-4>.
- Militzer M. Thermomechanical Processed Steels Reference Module in Materials Science and Materials Engineering, *Materials Processing*. Vol. 1, 2014. pp. 191–216, DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-096532-1.00115-1>.
- Sir Harshad Bhadeshia. Thermomechanical Treatment of Steels, *Microstructure and Properties (Fourth edition)*, 2017. pp. 271–301, DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100270-4.00010-X>.
- Lenard J. G. Mathematical and Physical Modelling of the Flat Rolling Process, *Primer on Flat Rolling*, Elsevier Ltd, 3 (2007) 36–98.
- Yunbo Xu, Yongmei Yu, Xianghua Liu, Guodong Wang. Modeling of microstructure evolution and mechanical properties during hot-strip rolling of Nb steels, *Journal of University of Science and*

- Technology. Beijing, Vol. 15, 2008. pp. 396–401. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1005-8850\(08\)60075-4](https://doi.org/10.1016/S1005-8850(08)60075-4).
6. Korczak P., Dyja H. Investigation of microstructure prediction during experimental thermo-mechanical plate rolling, *Journal of Materials Processing Technology*, 109, 2001. pp. 112–119. PII: S 0924-0136(00)00784-6.
 7. Kurpe O., Kukhar V., Klimov E., Prysiashnyi A. Thermomechanical Controlled Rolling of Hot Coils of Steel Grade S355MC at the Wide-Strip Rolling Mill 1700, *Materials Properties and Technologies of Processing, Solid State Phenomena* Vol. 291, 2018, pp. 63–71.
 8. Kurpe O., Kukhar V. Mastering high-strength shipbuilding steel plate production using thermo-mechanical controlled process (TMCP) at the rolling mill 3600, *Engineering sciences: Development prospects in countries of Europe at the beginning of the third Millennium, Collective monograph*, Volume 1 Stalowa Wola, Poland 2018, pp. 281–298.
 9. Xiangwei Kong, Liangyun Lan. Optimization of mechanical properties of low carbon bainitic steel using TMCP and accelerated cooling, *11th International Conference on Technology of Plasticity, ICTP*, 2014. pp. 19–24. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.09.136>.
 10. Daniel Weisz-Patrault. Coupled heat conduction and multiphase change problem accounting for thermal contact resistance, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017. P. 595–606, DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.08.091.
 11. Daniel Weisz-Patrault, Alain Ehrlicher, Nicolas Legrand. Temperature and heat flux fast estimation during rolling process, *International Journal of Thermal Sciences*, 2014. P. 1–20, DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2013.07.010.
 12. Daniel Weisz-Patrault. Inverse three-dimensional method for fast evaluation of temperature and heat flux fields during rolling process, *Symposium on Modelling of Rolling Processes*, 2012, France, P.20–22.
 13. Кухарь В. В., Присяжный А. Г., Балалаева Е. Ю., Тузенко О. А., Курпе А. Г., Анищенко А. С., Кармазина И. В. Управление тепловым состоянием тонколистового проката для повышения равномерности распределения механических свойств, *Мариуполь: ПГТУ*, 2018. 144 с.
 14. Тайц Н. Ю., Розенгарт Ю. И. Методические нагревательные печи, М.: *Металлургиздат*, 1964.
 15. Расчет нагревательных и термических печей. Справочник, Ред. Тымчака В. М., Гусовского В. Л., М.: *Металлургия*, 1983.
 16. Казанцев Е. И. Промышленные печи, М.: *Металлургия*, 1975.
 3. Sir Harshad Bhadeshia. Thermomechanical Treatment of Steels, *Microstructure and Properties (Fourth edition)*, 2017. pp. 271–301, DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100270-4.00010-X>.
 4. Lenard J. G. Mathematical and Physical Modelling of the Flat Rolling Process, *Primer on Flat Rolling, Elsevier Ltd*, 3 (2007) 36–98.
 5. Yunbo Xu, Yongmei Yu, Xianghua Liu, Guodong Wang. Modeling of microstructure evolution and mechanical properties during hot-strip rolling of Nb steels, *Journal of University of Science and Technology*. Beijing, Vol. 15, 2008. pp. 396–401. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1005-8850\(08\)60075-4](https://doi.org/10.1016/S1005-8850(08)60075-4).
 6. Korczak P., Dyja H. Investigation of microstructure prediction during experimental thermo-mechanical plate rolling, *Journal of Materials Processing Technology*, 109, 2001. pp. 112–119. PII: S 0924-0136(00)00784-6.
 7. Kurpe O., Kukhar V., Klimov E., Prysiashnyi A. Thermomechanical Controlled Rolling of Hot Coils of Steel Grade S355MC at the Wide-Strip Rolling Mill 1700, *Materials Properties and Technologies of Processing, Solid State Phenomena* Vol. 291, 2018, pp. 63–71.
 8. Kurpe O., Kukhar V. Mastering high-strength shipbuilding steel plate production using thermo-mechanical controlled process (TMCP) at the rolling mill 3600, *Engineering sciences: Development prospects in countries of Europe at the beginning of the third Millennium, Collective monograph*, Volume 1 Stalowa Wola, Poland 2018, pp. 281–298.
 9. Xiangwei Kong, Liangyun Lan. Optimization of mechanical properties of low carbon bainitic steel using TMCP and accelerated cooling, *11th International Conference on Technology of Plasticity, ICTP*, 2014. pp. 19–24. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.09.136>.
 10. Daniel Weisz-Patrault. Coupled heat conduction and multiphase change problem accounting for thermal contact resistance, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017. P. 595–606, DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.08.091.
 11. Daniel Weisz-Patrault, Alain Ehrlicher, Nicolas Legrand. Temperature and heat flux fast estimation during rolling process, *International Journal of Thermal Sciences*, 2014. P. 1–20, DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2013.07.010.
 12. Daniel Weisz-Patrault. Inverse three-dimensional method for fast evaluation of temperature and heat flux fields during rolling process, *Symposium on Modelling of Rolling Processes*, 2012, France, P.20–22.
 13. Kukhar V. V., Prisyazhnyy A. G., Balalaeva E. Ju., Tuzenko O. A., Kurpe A. G., Anishhenko A. S., Karmazina I. V. Upravlenie teplovym sostojaniem tonkolistovogo prokata dlja povysheniya ravnomernosti raspredelenija mehanicheskikh svojstv, Mariupol: PGTU, 2018. 144 p.
 14. Tajc N. Ju., Rozengart Ju.I. Metodicheskie nagrevatel'nye pechi, Moscow: Metallurgizdat, 1964.
 15. Raschet nagrevatel'nyh i termicheskikh pechej. Spravichnik, Red. Tymchaka V. M., Gusovskogo V. L., Moscow: Metallurgija, 1983.
 16. Kazancev E. I. Promyshlennye pechi, Moscow: Metallurgija, 1975.

References (transliterated)

1. Zinchenko Yu. A. Kurpe A. G., Bagmet O. A. Prospects of the technology used to make skelp at the Azovstal metallurgical combine, *Metallurgist*, Vol. 52, Nos. 7–8, 2008. pp. 461–463, DOI: <https://doi.org/10.1007/s11015-008-9065-4>.
2. Militzer M. Thermomechanical Processed Steels Reference Module in Materials Science and Materials Engineering Comprehensive, *Materials Processing*. Vol. 1, 2014. pp. 191–216, DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-096532-1.00115-1>.

Надійшла (received) 16.05.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Курпе Олександр Геннадійович (Kurpe Aleksandr Gennadiyovich) – кандидат технічних наук, ТОВ «МЕТІНВЕСТ ХОЛДІНГ», головний експерт, Маріуполь, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2039-7239>; e-mail: aleksandr.kurpe@gmail.com

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

А. И. ЛЕЩЕНКО, В. А. ТОКМАКОВ, К. Ю. КЛЮЧНИКОВ

МЕТОДЫ РАСЧЕТА НАПРЯЖЕНИЯ ВОЛОЧЕНИЯ В РОЛИКОВЫХ ВОЛОКАХ

Выполнен обзор известных методов по определению напряжения волочения в двухвалковых роликовых волокнах и оценка их точности путем сравнения расчетных значений с экспериментальными данными. Рассмотрены методы, основанные на решении уравнения равновесия сил в очаге деформации и методы, основанные на решении уравнения энергетического баланса в очаге деформации. Сравнение расчетных и экспериментальных значений напряжения волочения показало, что при прокатке-волочении медных образцов погрешность расчета может достигать 40-45% при использовании выражений, полученных из условия равновесия сил в очаге деформации и 45-50% при использовании выражений, основанных на решении уравнения энергетического баланса. При прокатке-волочении стальных образцов максимальная погрешность расчета достигает 40% при использовании выражений, полученных из условия равновесия сил в очаге деформации и 45% при использовании выражений, основанных на решении уравнения энергетического баланса. Установлено, что выражения для определения напряжения волочения в двухвалковых роликовых волокнах, полученные из условия равновесия сил в очаге деформации не учитывают ряд факторов, характеризующих процесс прокатки-волочения в роликовой волоке, и поэтому могут использоваться для приближенной оценки кинематических и энергосиловых параметров деформации. На основании сравнения расчетных и экспериментальных значений величины напряжения волочения сделан вывод о необходимости разработки математической модели процесса деформации в роликовых волокнах на основе энергетической теории прокатки.

Ключевые слова: роликовые волокна, напряжение волочения, метод расчета

О. І. ЛЕЩЕНКО, В. А. ТОКМАКОВ, К. Ю. КЛЮЧНИКОВ

МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ НАПРУГИ ВОЛОЧІННЯ У РОЛІКОВИХ ВОЛОКАХ

Виконано огляд відомих методів по визначенню напруги волочіння у двовалкових роликових волокнах і оцінка їх точності шляхом порівняння розрахункових значень з експериментальними даними. Розглянуто методи, засновані на рішенні рівняння рівноваги сил в осередку деформації і методи, засновані на рішенні рівняння енергетичного балансу в осередку деформації. Порівняння розрахункових і експериментальних значень напруги волочіння показало, що при прокатці-волочінні мідних зразків похибка розрахунку може досягати 40-45% при використанні виразів, отриманих з умови рівноваги сил в осередку деформації і 45-50% при використанні виразів, заснованих на вирішенні рівняння енергетичного балансу. При прокатці-волочінні сталевих зразків максимальна похибка розрахунку досягає 40% при використанні виразів, отриманих з умови рівноваги сил в осередку деформації і 45% при використанні виразів, заснованих на вирішенні рівняння енергетичного балансу. Встановлено, що вирази для визначення напруги волочіння у двовалкових роликових волокнах, отримані з умови рівноваги сил в осередку деформації, не враховують ряд факторів, які характеризують процес прокатки-волочіння у роликових волокнах, і тому можуть використовуватися для наближеної оцінки кінематичних і енергосилових параметрів деформації. На підставі порівняння розрахункових і експериментальних значень величини напруги волочіння зроблено висновок про необхідність розробки математичної моделі процесу деформації у роликових волокнах на основі енергетичної теорії прокатки.

Ключові слова: роликові волокна, напруга волочіння, метод розрахунку

A. I. LESHCHENKO, V. A. TOKMAKOV, K. Y. KLUCHNIKOV

METHODS OF CALCULATION OF TENSION OF ROLLER DIE DRAWING

The review of the known methods on determination of tension of drawing in double roller die plates and assessment of their precision is executed by comparing estimated values with experimental data. Methods, based on the resolution of equation of balance of powers in a hearth deformations and methods, based on the resolution of equation of energy balance in the hearth of deformation, are considered. Comparison of estimated and experimental values of tension of drawing showed that at rolling-drawing of copper samples the error of calculation can reach 40-45% when using expressions, derived from the equation of balance of powers in a hearth deformations and 45-50% when using expressions, derived from equation of energy balance in the hearth of deformation. At rolling-drawing of steel samples the maximal error of calculation reaches 40% when using expressions, derived from the equation of balance of powers in a hearth deformations and 45% when using expressions, derived from equation of energy balance in the hearth of deformation. It is concluded that expression for determination of tension of drawing in double roller die plates, derived from the equation of balance of powers in hearth deformations does not take into account a number of factors, characterizing the process of rolling-drawing in roller die plates, and therefore can be used for the approximate estimation of kinematic and power parameters of deformation. Based on comparison of estimated and experimental values of tension of drawing, the necessity of development of mathematical model of process of deformation for roller die plates on the basis of power theory of rolling was shown.

Key words: roller dies, tension drawing, calculation method

Постановка задачі. Процес прокатки-волочення широко применяется при обработке металлов давлением. Разработаны процессы и технологическое оборудование для производства простых и сложных профилей из черных и цветных металлов и сплавов, получает все большее распространение производство холоднодеформированной арматуры на специализированных линиях [1]. Исследуются вопросы прокатки-волочения профилей из материалов, обладающих особыми свойствами [2].

Напряжение волочения влияет на удельное давление и силу прокатки и, соответственно, на геометрические размеры деформирующего инструмента (валков), определяет мощность тягового

механизма, влияет на стабильность протекания технологического процесса прокатки-волочения (обрывность при волочении). Однако отмечено, что «...до сих пор не существует совершенной теории волочения, которую можно было использовать для предсказания усилия волочения, возникающего при данном способе с приемлемой степенью точности» [1, с. 130].

Кроме того, в известных теоретических решениях по определению напряжения волочения в роликовых волокнах отсутствует сравнение рассчитанных значений напряжения волочения по предлагаемым моделям с экспериментальными значениями, что

затрудняет оценку адекватности предлагаемых моделей.

Таким образом, вопрос о выборе метода расчета напряжения волочения в роликовых волоках, обеспечивающего наиболее точное определение этого параметра, является актуальным.

Целью работы является обзор известных методов по определению напряжения волочения в роликовых волоках и оценка их точности путем сравнения расчетных значений с экспериментальными данными.

Поскольку при прокатке-волочении широко применяются двухвалковые роликовые волоки, в рамках настоящей работы выполнена оценка применения известных методов расчета напряжения волочения в двухвалковых роликовых волоках (РВ).

Методы, основанные на решении уравнения равновесия сил в очаге деформации

В работе [3] исходя из решения уравнения А. И. Целикова для определения среднего удельного давления при прокатке с натяжением, получено выражение для определения напряжения волочения при прокатке-волочении

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_S} = 1,15(1 - \xi_1), \quad (1)$$

где ξ_1 – коэффициент переднего натяжения,

$$\xi_1 = \frac{a\varphi(\delta-1)\frac{\Delta h}{h_1} - \frac{\delta-1}{2(\delta+1)}\left(\frac{h_K}{h_1}\right)^{\delta+1} \cdot \frac{1}{\delta+1} \cdot \frac{h_K}{h_1}}{a\varphi(\delta-1)\frac{\Delta h}{h_1} - \frac{\delta-1}{2(\delta+1)}\left(\frac{h_K}{h_1}\right)^{\delta+1} \cdot \frac{1}{\delta+1}}$$

a – безразмерный коэффициент,

$$a = \frac{1}{2(1+S)\ln\frac{h_0}{h_1}};$$

φ – коэффициент упрочнения,

$$\varphi = \frac{\sigma_{\text{вых}}}{0,5(\sigma_{\text{вх}} + \sigma_{\text{вых}})};$$

δ – показатель деформации,

$$\delta = \frac{2f}{\alpha_0};$$

$\frac{h_K}{h_1}$ – отношение высоты полосы в критическом сечении к высоте полосы на выходе из очага деформации,

$$\frac{h_K}{h_1} = \sqrt{\frac{h_0}{h_1}};$$

S – опережение,

$$S = \frac{h_1}{\Delta h} \left(\frac{h_K}{h_1} - 1 \right)^2.$$

В выражении (1) и его составляющих приняты следующие обозначения:

σ_1 – напряжение волочения, необходимое для деформации металла в РВ (величина σ_1 будет упоминаться далее по тексту без ее расшифровки);

σ_s – среднее напряжение текучести деформируемого металла (величина σ_s будет упоминаться далее по тексту без ее расшифровки);

$\sigma_{\text{вых}}$ – напряжение текучести деформируемого металла на выходе из очага деформации;

$\sigma_{\text{вх}}$ – напряжение текучести деформируемого металла на входе в очаг деформации;

h_0 – высота раската перед РВ;

h_1 – высота раската после РВ;

Δh – абсолютное обжатие раската в РВ;

h_K – высота полосы в критическом сечении;

f – коэффициент трения на поверхности касания в очаге деформации в РВ;

α_0 – угол касания металла с валками в очаге деформации в РВ.

В работе [4] И. Л. Перлиным для определения напряжения волочения при волочении в роликовой волоке получено выражение

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_S} = 1,15\gamma_c \frac{A+1}{A} \left[1 - \left(\frac{h_1}{h_0} \right)^A \right], \quad (2)$$

где γ_c – коэффициент, учитывающий траектории продольных главных напряжений у выхода из деформационной зоны,

$$\gamma_c = \frac{\alpha + \rho}{\sin(\alpha + \rho)};$$

α – приведенный угол, равный половине угла касания α_0 ($\alpha = 0,5\alpha_0$);

ρ – угол трения,

$$\rho = \text{artg} \left[\frac{1}{4\sqrt{\pi}} \left(\frac{\Pi_0}{\sqrt{F_0}} + \frac{\Pi_1}{\sqrt{F_1}} \right) \cdot f \cdot \frac{\lambda-1}{2(\lambda+1)} \right];$$

A – безразмерный коэффициент,

$$A = \cos^2 \rho \cdot \left(1 + f \cdot \frac{\lambda-1}{2(\lambda+1)} \cdot \text{ctg} \alpha \right) - 1.$$

В выражении (2) и его составляющих приняты следующие обозначения:

λ – коэффициент вытяжки;

Π_0, Π_1 – периметр раската до и после деформации соответственно;

F_0, F_1 – площадь раската до и после деформации соответственно.

В работе [5] Ю. И. Коковихина на основании совместного решения дифференциального уравнения равновесия, условия пластичности для осесимметричной деформации и при условии трения на контакте по закону Зибеля, получено следующее выражение для определения напряжения волочения при волочении в роликовой волоке

$$\sigma_1 = \sigma_{\text{вых}} - \sigma_{\text{вх}} c [2\lambda_n - (\lambda + 1)] - (m - \sigma_{\text{вх}})(\lambda - 1). \quad (3)$$

В выражении (3) приняты следующие обозначения:

c – коэффициент, определяющий замену криволинейной поверхности контакта хордой,

$$c = f \cdot \text{artg} \alpha_0;$$

λ_n – величина вытяжки в нейтральном сечении,

$$\lambda_H = \sqrt{\lambda};$$

m – модуль упругости деформируемого материала,

$$m = (\sigma_{\text{вых}} - \sigma_{\text{вх}}) / (\lambda - 1).$$

В работе [6] приведено следующее выражение для определения напряжения волочения в роликовой волоке

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_S} = 1 - \left(\frac{h_1}{h_0}\right)^{\frac{4}{\pi}} \times e^{\Delta}, \quad (4)$$

где коэффициент Δ рассчитывается по выражению

$$\Delta = \frac{4f}{\pi} \left[\frac{E}{\sqrt{E^2-1}} \times \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{E^2-1} \times \sin \alpha_0}{E \times \cos \alpha_0 - 1} \right) \right] - \frac{2E}{\sqrt{E^2-1}} \times \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{E^2-1} \times \sin \frac{\alpha_0}{2}}{E \times \cos \frac{\alpha_0}{2} - 1} \right).$$

Обозначения, принятые в выражении (4):

E – коэффициент, определяемый из выражения

$$E = 1 + 0,5h_1/R;$$

R – радиус неприводного вала РВ.

В работе [7] В. А. Николаева приведено выражение для определения напряжения волочения, полученное из условия равновесия горизонтальных составляющих сил, действующих в очаге деформации, в виде

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_S} = \frac{f_\sigma \Delta h}{f h_1} \left[1 + \frac{2f}{\alpha_0} \left(\frac{2\gamma}{\alpha_0} - 1 \right) \right]. \quad (5)$$

Отношение нейтрального угла к углу касания γ/α_0 предлагается принимать в диапазоне $0,55 \div 0,60$, а отношение показателя сил трения f_σ к коэффициенту трения на поверхности касания f – в диапазоне $0,86 \div 0,91$, согласно исследованиям автора работы [7]. Однако в указанной работе нет рекомендаций по выбору величин отношений γ/α_0 и f_σ/f для конкретных условий прокатки-волочения, а также не указан способ определения напряжения текучести деформируемого металла в очаге деформации РВ. В связи с этим, разбег значений при определении величины напряжения волочения по выражению (5) может достигать $20 \div 25\%$ только за счет применения нижней или верхней границ отношений γ/α_0 и f_σ/f .

В работе [1] приведено выражение для определения напряжения волочения в РВ, представленное нами в относительных напряжениях

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_S} = 1,15 \left[1 - \left(\frac{h_1}{h_0}\right)^{\frac{4}{\pi}} \times \exp[f\beta(\alpha - 2\alpha')] \right] \quad (6)$$

где $\beta = \frac{8}{\pi \sqrt{h_1/R}}$; $\alpha = \text{artg} \frac{\alpha_0}{\sqrt{h_1/R}}$; $\alpha' = \text{artg} \frac{\alpha_0}{2\sqrt{h_1/R}}$.

Анализ выражений (1–6) показывает, что выражения для определения напряжения волочения раската в роликовой волоке, полученные из решения уравнения равновесия сил в очаге деформации, обобщенно можно представить в виде

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_S} = A \cdot (1 - B),$$

где A – коэффициент, учитывающий неравномерность деформации;

B – коэффициент, учитывающий влияние геометрических параметров очага деформации и коэффициента трения на контакте полоса-валок на напряжение волочения.

С использованием выражений (1–6) были выполнены расчеты величины напряжения волочения, необходимого для осуществления процесса деформации в РВ. Режимы деформации при расчете и экспериментальные значения напряжения волочения приняты по экспериментальным данным прокатки-волочения медных (медь марки М1) и стальных (сталь марки 08) полос, представленным в работе [3]. Значения напряжения текучести металла определялись по кривым упругости, полученным авторами работы [3] экспериментально для использованных в опытах образцов. Значения коэффициента трения на контактных поверхностях очага деформации при установившемся процессе деформации в РВ приняты по данным работы [8] и составляют $f = 0,18$ для медных и $f = 0,2$ для стальных образцов.

На рис. 1 и 2 приведены значения погрешности расчета величины напряжения волочения по указанным выражениям при прокатке-волочении медных и стальных образцов.

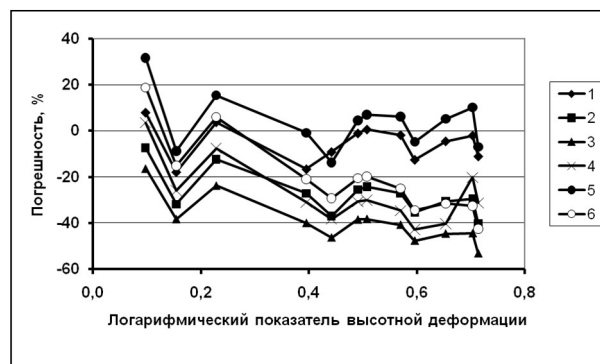


Рис. 1 – Погрешность расчета величины напряжения волочения при прокатке-волочении медных образцов при изменении логарифмического показателя высотной деформации:

1–по выражению (1); 2–(2); 3–(3); 4–(4); 5–(5); 6–(6)

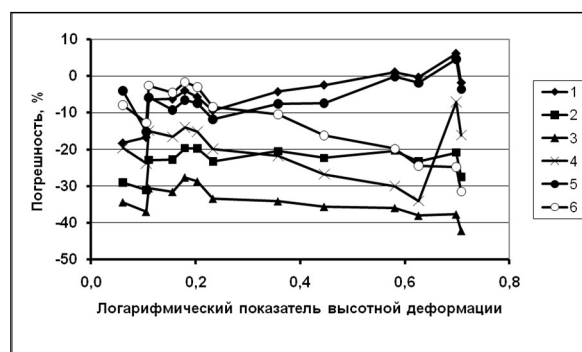


Рис. 2 – Погрешность расчета величины напряжения волочения при прокатке-волочении стальных образцов при изменении логарифмического показателя высотной деформации:

1–по выражению (1); 2–(2); 3–(3); 4–(4); 5–(5); 6–(6)

Основываясь на результатах расчетов по определению величины напряжения волочения при прокатке-волочении для различных металлургических материалов, можно установить, что наименьшая погрешность расчета величины напряжения волочения достигается при использовании выражений (1) и (6) – 17...+15%. При использовании выражения (3) погрешность расчета величины тягового напряжения максимальна.

Методы, основанные на решении уравнения энергетического баланса в очаге деформации

В работе [9] Ш. Гелеи предложено выражение для определения напряжения волочения в РВ, представленное нами в относительных напряжениях и в современной записи

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_s} = \frac{n_\sigma}{F_1} \left[l_d b_{cp} f \left(1 - \frac{h_1}{h_0} \frac{1}{\cos \alpha_0} \right) + \right] + 0,58 \frac{l_d}{D}, \quad (7)$$

где n_σ – коэффициент, учитывающий влияние напряженного состояния, определяется из выражения

$$n_\sigma = \frac{1 - 0,29 \frac{\alpha_0}{2}}{1 + \frac{\Delta h b_{cp} + l_d b_{cp} f \left(1 - \frac{h_1}{h_0} \frac{1}{\cos \alpha_0} \right)}{2F_1}};$$

b_{cp} – средняя ширина раската в очаге деформации;

l_d – длина очага деформации;

d – диаметр шейки валка РВ;

D – диаметр валка РВ;

$f_{ш}$ – коэффициент трения в опорах валков РВ.

В выражении (7) автор работы [9] учитывает работу деформации, работу, затраченную на преодоление сил трения на контакте полоса-валок, работу, затраченную на преодоление сил трения в опорах валков, и работу, затраченную на преодоление внутренних сдвигов.

В работе [10] рассмотрен процесс волочения полосы через волоку с неприводными валками в условиях плоской деформации. Для анализа этого процесса использована гипотеза плоских сечений, дуга захвата заменена хордой. При составлении уравнения энергетического баланса учитывалась мощность внутренних сил, мощность среза на поверхности входа в очаг деформации, мощность сил трения на контактной поверхности и мощность на преодоление сил трения в опорах неприводных валков.

Итоговые выражения, полученные в работе [10], можно записать в следующем виде:

при использовании условия постоянства сил трения по длине очага деформации $\tau = \psi \tau_s$

$$\frac{\sigma_1}{1,15\sigma_s} = \ln \frac{1}{\eta} + \frac{\alpha_0}{4} + \frac{\psi}{\alpha_0} \ln \frac{[1 + m(\frac{1}{\eta} - 1)]^2}{\frac{1}{\eta}}, \quad (8)$$

при использовании закона трения в виде $\tau = f p_{cp}$

$$\frac{\sigma_1}{1,15\sigma_s} = \left(\ln \frac{1}{\eta} + \frac{\alpha_0}{4} \right) \left(1 + \frac{2f}{\alpha_0} (2m - 1) \right). \quad (9)$$

Обозначения, принятые в выражениях (8)–(9):

$\frac{1}{\eta}$ – коэффициент обжатия;

ψ – функция, зависящая от соотношения размеров очага деформации и состояния трущихся поверхностей [10];

m – параметр, характеризующий положение нейтрального сечения. Для выражения (8) m определяется как

$$m = 0,5 + \frac{f_{ш}}{\psi} \frac{p_c}{1,15\sigma_s} \frac{R_{ш}}{R},$$

а для выражения (9) как

$$m = 0,5 \left(1 + \frac{f_{ш} R_{ш}}{f R} \right),$$

где $R_{ш}$ – радиус шейки валка РВ.

В работе [11] отмечено, что величина ψ является сложной функцией ряда механических и физико-химических факторов и ее определение возможно лишь экспериментальным путем. По этой причине в настоящем обзоре будет рассмотрено только выражение (9).

В работе [12] В. Г. Шеркунова и А. А. Штера выражение для определения напряжения волочения имеет следующий вид:

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_s} = n \ln \lambda + 2mf \left(\frac{2F_2 - F_n}{S_c} \right), \quad (10)$$

где n – коэффициент, учитывающий неравномерность деформации [13];

m – коэффициент, учитывающий количество роликов в калибре ($m=1$ для двухвалковых калибров);

F_2 – площадь зоны опережения в очаге деформации;

F_n – полная площадь контакта в очаге деформации;

S_c – средняя площадь поперечного сечения раската в очаге деформации.

В работе [14] приведена следующая зависимость для определения напряжения волочения при прокатке-волочении ненаклепанного металла:

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_s} = 1,15 \left[\ln \lambda \left(1 + 0,72 a_1 \sqrt{\ln \lambda} \right) + 0,3 \sqrt{\frac{\Delta h}{R} \left(1 + B^2 \frac{b_0^2}{h_0^2} \right)} + 0,5f \left(\frac{\Delta h}{h_{cp}} \right) \sqrt{\frac{R}{\Delta h}} \right], \quad (11)$$

где a_1 – коэффициент, учитывающий прочностную характеристику деформируемой стали [14];

B – зависимость для расчета показателя поперечной деформации при прокатке-волочении полосы на гладких роликах:

$$B = 0,1 \left(\frac{R}{h_0} \right)^{0,32} \left(\frac{h_0}{b_0} \right)^{0,9} \varepsilon^{-0,22}.$$

При выводе зависимости (11) авторы работы [14] учитывали затраты энергии на работу формообразования, на преодоление сил контактного трения и трения в подшипниках роликовой волоки.

К недостаткам представленного в работе [14] метода следует отнести ограниченное количество марок сталей, для которых определены коэффициенты, учитывающие прочностную характеристику деформируемой стали.

В работе [15] напряжение волочения при волочении в двухроликовой волоке предложено определять по формуле

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_s} = \left(0,8 + \frac{\Delta'}{4,4}\right) \ln\left(\frac{1}{1-r}\right), \quad (12)$$

где Δ' – геометрический параметр зоны деформации,

$$\Delta' = \sqrt{\frac{h_0}{4Rr}} (2 - r),$$

$$r = 1 - (F_1/F_0).$$

По структуре выражения (12) можно определить, что оно не учитывает потери на преодоление трения на контакте полоса-валок и на преодоления трения в опорах валков роликовой волоки.

С использованием выражений (7), (9) – (12), полученных исходя из решения уравнения энергетического баланса в очаге деформации, выполнены расчеты величины напряжения волочения, необходимого для осуществления процесса деформации в РВ. Режимы деформации, экспериментальные значения напряжения волочения, значения напряжения текучести металла приняты на основании данных, представленных в работе [3]. Значения коэффициента трения при установившемся процессе деформации в РВ приняты на основании работы [8] и составляют: $f = 0,18$ для медных и $f = 0,2$ для стальных образцов.

На рис. 3 и 4 приведены значения погрешности расчета величины напряжения волочения при прокатке-волочении медных и стальных образцов. Расчет напряжения волочения образцов из меди марки М1 по выражению (11) не выполняли, так как в работе [14] не приведены коэффициенты, учитывающие прочностную характеристику данного материала.

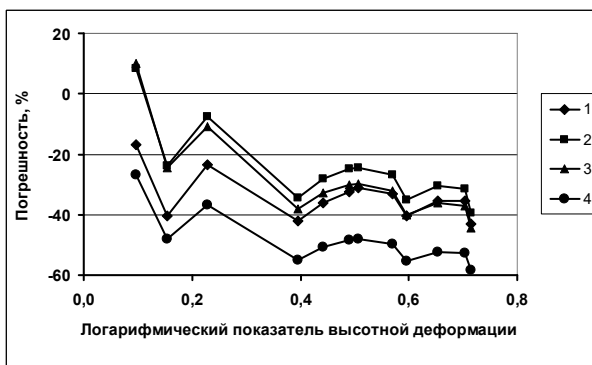


Рис. 3. Погрешность расчета величины напряжения волочения при прокатке-волочении медных образцов при изменении логарифмического показателя высотной деформации:

1 – по выражению (7); 2 – (9); 3 – (10); 4 – (12)

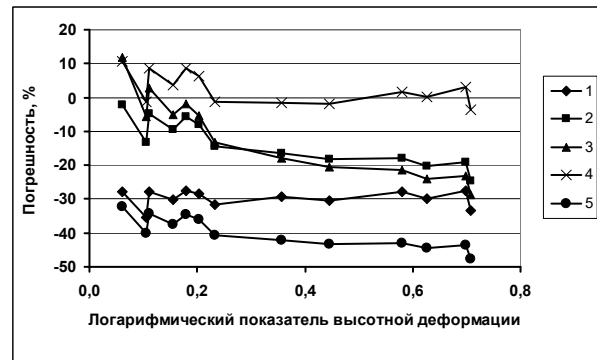


Рис. 4 – Погрешность расчета величины напряжения волочения при прокатке-волочении стальных образцов при изменении логарифмического показателя высотной деформации:

1–по выражению (7); 2–(9); 3–(10); 4–(11); 5–(12)

Основываясь на результатах расчетов по определению величины напряжения волочения при прокатке-волочении с применением методов, основанных на решении уравнения энергетического баланса в очаге деформации, можно установить следующее:

- наименьшая погрешность расчета величины напряжения волочения при прокатке-волочении стальных образцов достигается при использовании выражения (11) – $-7...+11\%$. При прокатке-волочении медных образцов наименьшая погрешность расчета достигается при использовании выражения (9) – $-39...+8\%$. При использовании выражения (12) погрешность расчета величины напряжения волочения максимальна в обоих случаях;

- выражение (11) невозможно использовать для определения величины напряжения волочения при деформации материалов, для которых в работе [14] не приведены коэффициенты, учитывающие прочностную характеристику деформируемого материала.

Выводы. На основании выполненного обзора выражений для расчета напряжения волочения, требуемого для деформации раската в двухроликовой волоке, можно сделать следующие выводы.

1. Выражения, полученные из условия равновесия сил в очаге деформации проще, чем выражения, полученные из решения уравнения энергетического баланса, однако они не учитывают ряд факторов, характеризующих процесс прокатки-волочения в роликовой волоке, и поэтому могут использоваться для приближенной оценки кинематических и энергосиловых параметров деформации.

2. Выражения, полученные из решения уравнения энергетического баланса, учитывают, что энергия, подаваемая в очаг деформации роликовой волоки, расходуется на деформацию раската, на преодоление трения скольжения на контактной поверхности раскат-валок и на преодоление сопротивления, создаваемого опорами роликовой волоки.

3. Результаты сравнения расчетных и экспериментальных значений величины напряжения волочения в процессе прокатки-волочения указывают

на необходимость разработки математической модели процесса деформации в роликовых волоках на основе энергетической теории взаимодействия прокатываемой полосы и валков.

Список литературы

1. Битков В. В. Технология и машины для производства проволоки. Екатеринбург: УрО РАН, 2004. ISBN 5-7691-1404-5.
2. The application of drawing technology with roller-die in the Nb-Zr wire production / Wu Menghai, Zhao Hongzhang, Li Jixian, Fan Huiru // Ningxia Engineering Technology, 2008. – No 4.
3. Тарновский И. Я., Шилов В. И. Прокатка-волочение в неприводных валках / Расчет и конструирование заводского оборудования. Сб. статей. Вып. 64. Mashgiz, 1958. – С. 111–127.
4. Перлин И. Л., Ерманок М. З. Теория волочения. Москва: Metallurgiya, 1971. – 448 с.
5. Коковіхін Ю. І. Технологія сталедротового виробництва: Підручник. Київ. 1995. – 608 с. Рос. мовою.
6. Зинутти А., Саро Д. Преимущества роликовых волок при волочении проволоки / Специализированный журнал «Метизы». – Ассоциация «РосМетиз», 2009. – №1 (20) – С. 37–41.
7. Николаев В. А. Напряжение при волочении полос в неприводных валках / В. А. Николаев // Металл и литье Украины. – 2009. – №4-5. – С. 70–72.
8. Грудев А. П. Внешнее трение при прокатке / А. П. Грудев – М.: Metallurgiya, 1973. – 288 с.
9. Гелеи Ш. Расчет усилий и энергии при пластической деформации металлов / Ш. Гелеи. – М: Metallurgizdat, 1958. – 420 с.
10. Степаненко В. И. Силовые условия при волочении через роликовую волоку / В. И. Степаненко, А. Г. Стукач, Л. М. Железняк // Известия ВУЗов. Черная металлургия. – 1973. – № 8. – С. 97–103.
11. Тарновский И. Я. Контактные напряжения при пластической деформации / И. Я. Тарновский, А. Н. Леванов, М. И. Поксеваткин – М.: Metallurgiya, 1966. – 280 с.
12. Шеркунов В. Г. Усилие волочения в роликовых волоках / В. Г. Шеркунов, А. А. Штер // Теория и технология прокатки: сборник научных трудов №209. – Челябинск, 1978. – С. 97-100.
13. Выдрин В. Н. Процесс непрерывной прокатки / Выдрин В. Н., Федосиенко А. С., Крайнов В. И. – М.: Metallurgiya, 1970. – 456 с.
14. Гулько В. И. Производство профилей и проволоки в роликовых волоках / В. И. Гулько, В. А. Войцеховский, А. К. Григорьев. – Ижевск: Удмуртия, 1989. – 132 с.

15. Wright, Roger N. Wire technology: process engineering and metallurgy / Roger N. Wright. Copyright © 2011, Elsevier Inc. p. 320.

References (transliterated)

1. Bitkov V. V. Tehnologija i mashiny dlja proizvodstva provoloki. Ekaterinburg: UrO RAN, 2004. ISBN 5-7691-1404-5.
2. The application of drawing technology with roller-die in the Nb-Zr wire production / Wu Menghai, Zhao Hongzhang, Li Jixian, Fan Huiru // Ningxia Engineering Technology, 2008. – No 4.
3. Tarnovskiy I. Ya., Shilov V. I. Prokatka-volochenie v neprivodnykh valkakh / Raschet i konstruirovanie zavodskogo oborudovaniya. Sb. statey. Vyp. 64. Mashgiz, 1958. – P. 111–127.
4. Perlin I. L., Ermanok M. Z. Teoriya volocheniya. Moscow: Metallurgiya, 1971. – 448 p.
5. Kokovikhin Yu. I. Tekhnologiya staledrotovogo virobnitstva: Pidruchnik. Kiiv. 1995. – 608 p. Ros. movoyu.
6. Zinutti A., Saro D. Preimushchestva rolkovykh volok pri volocheniі provoloki / Spetsializirovannyi zhurnal «Metizy». – Assotsiatsiya «RosMetiz», 2009. – No1 (20) – P. 37-41.
7. Nikolaev V. A. Napryazhenie pri volocheniі polos v neprivodnykh valkakh / V. A. Nikolaev // Metall i lit'e Ukrainy. – 2009. – No4-5. – P. 70-72.
8. Grudev A. P. Vneshnee trenie pri prokatke / A. P. Grudev – Moscow: Metallurgiya, 1973. – 288 p.
9. Gelei Sh. Raschet usilyi i energii pri plasticheskoy deformatsii metallov / Sh. Gelei. – Moscow: Metallurgizdat, 1958. – 420 p.
10. Stepanenko V. I. Silovye usloviya pri volocheniі cherez rolkovuyu voloku / V. I. Stepanenko, A. G. Stukach, L.M. Zheleznyak // Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya. – 1973. – No 8. – P. 97–103.
11. Tarnovskiy I. Ya. Kontaktnye napryazheniya pri plasticheskoy deformatsii / I. Ya. Tarnovskiy, A. N. Levanov, M. I. Poksevatkin – M.: Metallurgiya, 1966. – 280 p.
12. Sherkunov V. G. Usilie volocheniya v rolkovykh volokakh / V. G. Sherkunov, A. A. Shter // Teoriya i tekhnologiya prokatki: sbornik nauchnykh trudov No209. – Chelyabinsk, 1978. – P. 97-100.
13. Vydrin V. N. Protseess nepreryvnoy prokatki / Vydrin V. N., Fedosienko A. S., Krainov V. I. – M.: Metallurgiya, 1970. – 456 s.
14. Gul'ko V. I. Proizvodstvo profiley i provoloki v rolkovykh volokakh / V. I. Gul'ko, V. A. Voytsekhovskiy, A. K. Grigor'ev. – Izhevsk: Udmurtiya, 1989. – 132 p.
15. Wright, Roger N. Wire technology: process engineering and metallurgy / Roger N. Wright. Copyright © 2011, Elsevier Inc. p. 320.

Поступила (received) 10/06/2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Лещенко Олександр Іванович (Лещенко Александр Иванович, Leshchenko Alexandr Ivanovich) – Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова Національної академії наук України, відділ процесів і машин обробки металів тиском (ВОМТ), молодший науковий співробітник; м. Дніпро; Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1877-8358>; e-mail: leschenko.a.73@gmail.com

Токмаков Вадім Анатолійович (Токмаков Вадим Анатольевич, Tokmakov Vadim Anatolievich) – Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова Національної академії наук України, відділ процесів і машин обробки металів тиском (ВОМТ), молодший науковий співробітник; м. Дніпро; Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2599-7033>; e-mail: vtokmakov@technocenter.com.ua

Ключніков Кирило Юрійович (Ключников Кирилл Юрьевич, Kluchnikov Kirill Yuriyovich) – Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова Національної академії наук України, відділ процесів і машин обробки металів тиском (ВОМТ), молодший науковий співробітник; м. Дніпро; Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2465-3244>; e-mail: kirill.shaman.k@gmail.com

УДК 621.771.06

*Ю. Д. МУЗЫКИН, А. В. ГАЙДАМАКА, В. В. ТАТЬКОВ, А. А. РЯЗАНОВ***ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ДИНАМИКИ ИЗМЕНЕНИЯ МИКРОТВЕРДОСТИ АКТИВНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЗУБЬЕВ РЕДУКТОРА ВЕРТИКАЛЬНЫХ ВАЛКОВ СТАНА «СЛЯБИНГ 1150» ПАО «ЗАПОРОЖСТАЛЬ»**

Рассмотрены особенности условий эксплуатации механических приводов заготовочных станов и показано, что в условиях прямой транзитной прокатки в тандеме с непрерывным тонколистовым станом горячей прокатки 1680, технологический процесс может быть реализован только при условии высокой надежности работы зубчатых передач. Для контроля за их техническим состоянием предложено в качестве оценочного критерия использовать изменение микротвердости рабочих поверхностей зубьев, которое может быть установлено только экспериментально. Для проведения этих исследований предложен модифицированный ротatableльный центральный композиционный план, который в отличие от базового, несущественно увеличивает объем испытаний, позволяет строить не только трехпараметрическую модель, но и однопараметрические, которые существенно расширяют информативность полученных результатов. Проводя сопоставительный анализ динамики изменения микротвердости активных поверхностей зубьев, становится возможным в режиме «online» определять остаточный ресурс работы зацепления, а, следовательно, предотвращать аварийные ситуации.

Ключевые слова: стан слябинг, зубчатая передача, диагностика, распределение, планирование эксперимента, остаточный ресурс.

*Ю. Д. МУЗЫКИН, А. В. ГАЙДАМАКА, В. В. ТАТЬКОВ, О. А. РЯЗАНОВ***ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ОЦІНКА ДИНАМІКИ ЗМІНИ МІКРОТВЕРДОСТІ АКТИВНИХ ПОВЕРХНІ ЗУБІВ РЕДУКТОРА ВЕРТИКАЛЬНИХ ВАЛКІВ СТАНУ «СЛЯБІНГ 1150» ПАТ «ЗАПОРІЖСТАЛЬ»**

Розглянуто особливості умов експлуатації механічних приводів заготовчих станів і показано, що в умовах прямої транзитної прокатки в тандемі з безперервним тонколистовим станом гарячої прокатки 1680, технологічний процес може бути реалізовано тільки за умови високої надійності роботи зубчастих передач. Для контролю за їх технічним станом запропоновано в якості критерія оцінки використовувати зміну микротвердості робочих поверхонь зубців, яке може бути встановлено тільки експериментально. Для проведення цих досліджень запропоновано модифікований ротабельний центральний композиційний план, який на відміну від базового, незначно поширюючи обсяг випробувань, дозволяє будувати не тільки трьох параметричні моделі, але і одно параметричні, котрі суттєво розширюють інформативність отриманих результатів. Виконуючи порівняльний аналіз динаміки зміни микротвердості активних поверхонь зубців, стає можливим у режимі «online» визначити остаточний ресурс роботи зачеплення і таким чином запобігати аварійних ситуацій.

Ключові слова: стан слябінг, зубчаста передача, діагностування, розподілення, планування експерименту, остаточний ресурс.

*Yu. D. MUZYKIN, A. V. HAYDAMAKA, V. V. TATKOV, A. A. RYAZANOV***EXPERIMENTAL ASSESSMENT OF THE DYNAMICS OF CHANGES IN THE MICROHARDNESS OF THE ACTIVE SURFACES OF THE TEETH OF THE GEARBOX OF THE VERTICAL ROLLS OF THE MILL "SLABING 1150" PJSC "ZAPORIZHSTAL"**

The features of the operating conditions of mechanical drives of blank mills are considered and it is shown that in the conditions of direct transit rolling in tandem with a continuous thin-sheet hot rolling mill 1680, the technological process can be implemented only if the gears are highly reliable. To monitor their technical condition, it is proposed to use a change in the microhardness of the working surfaces of the teeth as an evaluation criterion, which can only be established experimentally. To conduct these studies, a modified rotatable central compositional plan was proposed, which, unlike the basic one, insignificantly increases the scope of tests, allows constructing not only a three-parameter model, but also one-parameter ones, which significantly expand the information content of the results. Carrying out a comparative analysis of the dynamics of changes in the microhardness of the active surfaces of the teeth, it becomes possible to determine the residual life of the engagement in the online mode, as well. hence prevent emergency situations.

Key words: slab mill, gear transmission, diagnostics, distribution, experiment planning, residual resource.

Введение. Сравнительный анализ условий работы механических приводов различного прокатного оборудования показал, что наиболее тяжелые условия наблюдаются в заготовочных станах, к которым относится «Слябинг 1150». Для этого оборудования характерны высокие нагрузки со значительной динамической составляющей, широкий спектр рабочих температур, значительный уровень низко- и высокочастотных вибраций, несоответствие класса кинематических пар требованиям статической определимости системы. Объясняется это как особенностями конструктивного решения слябинга, так и технологическими режимами его работы, главными из которых являются: наличие двух прокатных клетей, между которыми существует силовое замыкание через раскат в виде подпора или

натяжения; реверсивный режим работы стана, приводящий к неравномерности движения больших масс.

При движении раската по клетям стана в одном направлении толкающей может являться вертикальная клеть, где происходит снятие уширения и формирование боковых граней сляба, в другом направлении толкающей является горизонтальная клеть, где происходит обжим сляба. В обоих случаях, в силу особенностей компоновки стана, возможна как одиночная прокатка в одной клетке, так и совместная прокатка в двух клетях.

В момент реверса, когда направление вращения горизонтальных и вертикальных валков меняется на противоположное, происходит размыкание и новое замыкание во всех кинематических парах. Это

© Ю. Д. Музыкин, А. В. Гайдамака, В. В. Татьков, А. А. Рязанов, 2019

вызывает ударные динамические нагрузки, разрушающие контактирующие поверхности, а, следовательно, увеличивающие зазоры в сопряжениях. Именно разность скоростей элементов в кинематической паре в момент контакта является причиной дополнительной динамической нагрузки [1, 2].

Поэтому требование к обеспечению надежной работы «Слябинга 1150» является необходимым условием для эффективной работы в тандеме с непрерывным тонколистовым станом горячей прокатки 1680 в цехе ЦГПТЛ, который при условии прямой транзитной прокатки сляба обеспечивает существенную экономию энергоресурсов на ПАО «Запорожсталь» [3].

Цель работы. Постановка задачи. Одним из наиболее проблематичных узлов механического привода являются зубчатые передачи, которые в зависимости от условий работы могут испытывать различные виды изнашивания: механическое, молекулярно-механическое, коррозионно-механическое. Характер доминирующего вида разрушения зависит от конкретных условий работы, которые в большинстве случаев недетерминированы, а, следовательно, их влияние на рассматриваемые процессы можно оценивать только в вероятностной постановке. Поэтому в таких случаях наиболее объективный результат влияния каждого параметра на исследуемую величину может быть получен только экспериментальным путем при условии правильного планирования эксперимента. Составление такого плана испытаний, отвечающего критериям максимальной информативности при условии минимального объема экспериментальной работы, является в каждом конкретном случае актуальной и ответственной задачей.

Материалы исследований. Согласно стандарта на цилиндрические эвольвентные зубчатые передачи ГОСТ 21354-87 [4] при оценке технического состояния зацепления используется принцип суперпозиции эксплуатационных параметров, что позволяет реализовать условие линейного суммирования накопленных повреждений. В этом случае, осуществляя мониторинг накопленных повреждений и проводя сопоставительный анализ динамики их изменения, становится возможным по законным экстраполяции определять остаточный ресурс работы зубчатого зацепления и, следовательно, планировать ремонтные работы, исключая аварийные остановки [5].

Применительно к прокатному оборудованию справедливость данного утверждения была подтверждена экспериментально для силового редуктора чистовой клетки № 5 НТЛС 1680 ЦГПТЛ ПАО «Запорожсталь». Статистические исследования показали, что характер внешней нагрузки, действующей на зубья зацепления, подчиняется нормальному закону распределения, а показатель интенсивности нагружения зубьев соответствует типовому среднему равновероятному режиму [6]. Полученные результаты исследований можно

использовать и для других видов прокатного оборудования, в том числе и для стана «Слябинг 1150», так как условия нагружения силового редуктора являются интегральной характеристикой всего стана в целом.

Многочисленные наблюдения за работой силовых редукторов показали, что в подавляющем большинстве случаев разрушения зубьев носят усталостный характер, который связан с выкрашиванием боковых поверхностей зубьев. Согласно контактно-гидродинамической теории усталостного разрушения [7] при высоких контактных давлениях и обильной смазке за счет скольжения сопряженных поверхностей происходит развитие микротрещин и образование лунок (pitting). Проявление этого эффекта усиливается в крупномодульных зубчатых колесах. Таким образом, надежность и долговечность работы силовых редукторов прокатных станов зависит как от эксплуатационных параметров нагружения, которые являются недетерминированными, так и от технологических параметров конструктивного решения, которые являются детерминированными.

Для определения влияния всех перечисленных факторов на надежность и долговечность работы силовых редукторов необходимо выбрать объективный критерий оценки, фиксирующий истинное техническое состояние редуктора в режиме «online». Существует множество методов неразрушающего контроля технического состояния редукторов, однако, учитывая габаритные и весовые параметры, а также компоновку и условия работы привода, предлагается в качестве оценочного критерия использовать изменение микротвердости рабочей поверхности зуба [8, 9]. Так как рассмотренные параметры в процессе работы оказывают влияние на изменение твердости рабочей поверхности зубьев, с высокой степенью вероятности можно предположить, что оценочный критерий будет подчиняться нормальному закону распределения. Такое утверждение базируется на центральной предельной теореме для случайной величины, которая представляет результат воздействия большого числа независимых параметров [10]. В этом случае для экспериментального описания динамики изменения твердости рабочих поверхностей контактирующих зубьев наиболее эффективным является использование ротатбельного центрального композиционного плана (РЦКП), который позволяет получить изучаемую функцию отклика в виде полинома второго порядка.

Опыт использования данного плана показывает, что наиболее полным в условиях оптимальных затрат на проведение испытаний является трехфакторный эксперимент на трех уровнях. Однако три уровня не позволяют построить однопараметрические зависимости, которые нужны для изучения физики исследуемого процесса. Для этого желательно планировать эксперимент на пяти уровнях за счет использования модифицированного ротатбельного центрального композиционного плана (МРЦКП), который, не увеличивая существенно объем

испытаний, значительно расширяет объем полученной информации. Наличие пяти точек при построении однопараметрических зависимостей существенно повышает ее информативность, что особенно важно для нелинейных функций. Таким образом, планирование эксперимента – это процедура выбора числа и условий проведения опытов, необходимых для формализации действий при проведении испытаний и обработке результатов.

Для иллюстрации использования плана МРЦКП рассмотрена задача экспериментального определения скорости изменения микротвердости активной поверхности зубьев редуктора вертикальных валков стана «Слябинг 1150» обжимного цеха ПАО «Запорожсталь».

При очередном разрушении зубьев промежуточной шестерни редуктора привода вертикальных валков стана «Слябинг 1150», изготовленного на НКМЗ согласно чертежа 2-404352, была проведена экспертиза материала фрагмента разрушенного зуба. Исследования проведены лабораторией металловедения ПАО «Запорожсталь». Согласно чертежа материал шестерни – сталь 20ХН3А ГОСТ 4543-71, поковка гр. III ГОСТ 8479-70, твердость 250-310 НВ. Цементация по профилю зуба на глубину 2,0-2,4 мм, твердость 55-63 HRC.

Характерные следы разрушения позволили установить причины потери прочности – усталостный излом.

Результаты проверки химического состава материала шестерни представлены в таблице (исследование № 9810 от 15.04.2019).

Таблица. Химический состав материала шестерни

Химический элемент	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu	Mo
Содержание химического элемента в металле зуба. % по массе	0,42	0,67	0,29	0,016	0,010	0,72	1,38	0,11	0,19
Содержание химического элемента в стали марки 20ХН3А согласно ДСТУ 7806:2015. % по массе	0,17-0,24	0,30-0,60	0,17-0,37	Не более		0,60-0,90	2,75-3,15	Не более 0,30	-
				0,025	0,025				
Содержание химического элемента в стали марки 40ХН2МА согласно ДСТУ 7806:2015. % по массе	0,37-0,44	0,50-0,80	0,17-0,37	Не более		0,60-0,90	1,25-1,65	Не более 0,30	0,15-0,25
				0,025	0,025				

Химический состав металла детали соответствует стали марки 40ХН2МА вместо указанной в чертеже стали марки 20ХН3А согласно требований ДСТУ 7806:2015.

Контроль микроструктуры и твердости материала зуба выполнен по контуру на глубину 21 мм от вершины показал, что материал имеет упрочненный слой, представляющий собой отпущенный мартенсит твердостью 47 HRC. Микроструктура сердцевины зуба состоит из сорбитообразного перлита твердостью 363НВ.

По результатам выполненных исследований вывод лаборатории следующий: материал шестерни сталь 40ХН2МА, что не соответствует требованиям чертежа; твердость поверхностного слоя зуба 47 HRC и твердость основного металла зуба 363НВ также существенно отличаются от требований чертежа. Поэтому, учитывая линейные размеры зубчатого колеса, у которого модуль зацепления $m = 16$ мм, число зубьев $Z = 81$, наружный диаметр $d_a =$

1328 мм и шероховатость поверхности зуба $R_a 1,6$, становится очевидным, что при экспериментальном определении скорости изменения твердости рабочих поверхностей зуба в качестве варьируемых параметров следует принять: начальную твердость поверхности зуба, шероховатость активной поверхности зуба, вязкость используемого смазочного масла. Каждый из указанных параметров является случайной величиной, но может быть строго определен в конкретных условиях. При этом параметры, характеризующие условия работы обжимного стана, которые подчиняются нормальному закону распределения, могут рассматриваться как постоянная составляющая эксперимента.

Искомая функция отклика представляет математическую модель, связывающую изучаемый параметр Y с независимыми варьируемыми параметрами X . Так как характер исследуемой модели заранее не определен, функция отклика представлена в виде полинома второго порядка.

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i X_i + \sum_{i,j=1}^k b_{ij} X_i X_j + \sum_{i=1}^k b_{ii} X_i^2,$$

где b_0, b_i, b_{ij}, b_{ii} – коэффициенты при переменных; X_i, X_j – переменные в кодированной форме, связанные с их натуральным значением.

Параметры модели, то есть значения коэффициентов уравнения регрессии, имеют вид

$$b_0 = d_1 \sum_{u=1}^N y_u - d_2 \sum_{i=1}^k \sum_{u=1}^N X_{iu}^2 y_u;$$

$$b_i = d_3 \sum_{u=1}^N X_{iu} y_u;$$

$$b_{ij} = d_4 \sum_{u=1}^N (X_i X_j)_u \cdot y_u; \quad (i \neq j),$$

$$b_{ii} = d_5 \sum_{u=1}^N X_{iu}^2 y_u,$$

где d_1, d_2, \dots, d_7 – константы для вычисления параметров модели.

Определив таким образом значения коэффициентов регрессии, производится оценка дисперсии параметров модели

$$S^2(b_0) = d_1 S_b^2; \quad S^2(b_i) = d_3 S_b^2;$$

$$S^2(b_{ij}) = d_4 S_b^2;$$

$$S^2(b_{ii}) = d_7 S_b^2;$$

где S_b^2 – дисперсия воспроизводимости, которая определяется в центре плана, где выполняются параллельные эксперименты

$$S_b^2 = \frac{1}{n_0 - 1} \sum_{u=1}^{n_0} (y_{0u} - \bar{y}_0)^2;$$

\bar{y}_0 – среднее значение выхода искомого параметра

$$\bar{y}_0 = \frac{1}{n_0} \sum_{u=1}^{n_0} y_{0u}.$$

Оценка значимости полученных коэффициентов регрессии может быть проведена по t – критерию Стьюдента, позволяющему для каждого параметра модели вычислить доверительный интервал для заданного уровня значимости

$$\Delta(b) = \pm t(\alpha, f_1) S(b),$$

где $\Delta(b)$ – доверительный интервал для параметра;

$S(b)$ – стандартное отклонение параметра

$$S(b) = \sqrt{S^2(b)},$$

$t(\alpha, f_1)$ – критерий Стьюдента, который определяется в зависимости от числа

экспериментальных точек N и требуемого уровня значимости α .

В соответствии с доверительными интервалами, посчитанными для каждой группы коэффициентов b_0, b_i, b_{ij}, b_{ii} , можно произвести округление значений параметров модели, если они первого порядка малости, либо некоторые из них вообще выбросить, если они второго порядка малости.

Используя полученную зависимость в виде полинома второго порядка, можно определить значение функции отклика во всем интервале варьирования независимых переменных.

Для составления плана проведения эксперимента необходимо перейти от натуральной формы записи варьируемых параметров к кодированной. Для этого требуется произвести оценку границы области определения каждого фактора, а также выбрать основной уровень, который соответствует центру плана как многомерной точки в факторном пространстве. Кроме того, интервал варьирования не может быть меньше ошибки, с которой фиксируется уровень фактора.

Число уровней варьирования каждого фактора составляет пять:

Верхний уровень	+1	X_i^B
Нижний уровень	-1	X_i^H
Основной уровень	0	$X_i^0 = \frac{X_i^B + X_i^H}{2}$
Шаг варьирования	Δ	$\Delta X_i = \frac{X_i^B - X_i^H}{2}$
Звездные точки	$+\alpha X_i$	$X_i^0 + \alpha \Delta X_i$
	$-\alpha X_i$	$X_i^0 - \alpha \Delta X_i$

Рассматриваемый план РЦКП реализуется в виде матрицы планирования, основу которого составляет «ядро», представляющее полный факторный эксперимент (ПФЭ), к которому добавляются «звездные» точки. Координаты точек плана РЦКП в кодированном виде:

$$1(-1-1-1); 2(+1-1-1); 3(-1+1-1); 4(+1+1-1); 5(-1-1+1); 6(+1-1+1); 7(-1+1+1); 8(+1+1+1); 9(-\alpha 00); 10(\alpha 00); 11(0-\alpha 0); 12(0+\alpha 0); 13(00-\alpha); 14(00+\alpha); 15\dots 20(000).$$

Полученная функция отклика в виде полинома второго порядка позволяет исследовать трехпараметрическую зависимость, которая соответствует экспериментально полученным значениям в контролируемых точках плана. Однако для построения однопараметрических зависимостей типа $Y = f(X_1)$ при $X_2 = const$ и $X_3 = const$, когда варьирование переменной согласно РЦКП осуществляется на трех уровнях явно недостаточно и для построения экспериментальной кривой искомой функции количество уровней нужно увеличить. Поэтому, сохраняя принцип композиционности, к матрице РЦКП добавляется еще 6 точек, которые лежат на пересечении осей переменных параметров с

плоскостями куба, описывающими план ПФЭ. Такой план называется модифицированным ротатабельным центральным композиционным планом (МРЦКП). Обладая всеми достоинствами предыдущего плана, за счет незначительного увеличения экспериментальных точек, МРЦКП существенно увеличивает информативность полученных результатов и позволяет расширить перечень решаемых задач.

На рисунке представлена матрица МРЦКП при числе переменных факторов равном трем, которая последовательно включает в себя ПФЭ, РЦКП и дополняет их характерными точками, соответствующими линейной модели исследуемого процесса.

Координаты дополнительных точек в кодированном виде:

$$21(-10\ 0); 22(+10\ 0); 23(0-1\ 0); \\ 24(0+1\ 0); 25(0\ 0-1); 26(0\ 0+1).$$

По найденным пяти точкам вдоль каждого параметра строят графические однопараметрические зависимости при двух других фиксированных параметрах, соответствующих точке центра плана. Построенная однопараметрическая зависимость позволяет установить закон изменения искомого параметра в области его монотонного изменения. Построив теоретический график изменения искомого параметра и нанеся на него экспериментальные точки, можно определить их корреляцию и дополнительно установить адекватность полученной модели, представленной в виде полинома второго порядка, действительному закону исследуемого процесса.

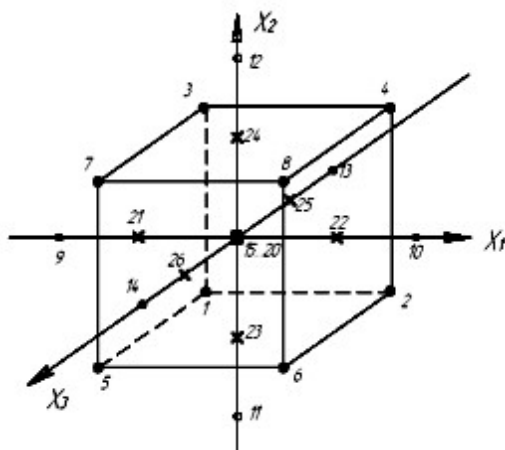


Рис. 1 – Трехфакторный модифицированный ротатабельный центральный композиционный план

- – ядро плана; ○ – звездные точки; ■ – центр плана;
- x – дополнительные точки

Для определения коэффициентов « b » уравнения регрессии используются результаты эксперимента, которые соответствуют точкам (1, 2, 3, ... 20). Произведя оценку значимости полученных коэффициентов регрессии и перейдя от нормализованной формы записи к натуральной модели, получим функцию изменения искомого параметра в зависимости от трех независимых

переменных, которая базируется на экспериментальных результатах.

По последним шести точкам плана эксперимента (21, 22, 23, 24, 25, 26) строятся однопараметрические зависимости изменения твердости поверхности зуба при варьировании одного из переменных параметров и фиксированных значениях двух других, которые соответствуют центру плана.

Фиксируя изменения микротвердости за ограниченный промежуток времени при условии варьирования тремя переменными параметрами согласно плану МРЦКП и принимая во внимание, что суммарное влияние всех параметров, характеризующих режим работы обжимного стана подчиняется нормальному закону распределения, может быть найдена фактическая скорость изменения микротвердости рабочей поверхности зуба. Установив таким образом временную связь, становится возможным при фиксированных крайних значениях микротвердости, выполняя сопоставительный анализ и учитывая законы экстраполяции, определять остаточный ресурс работы зубчатого зацепления в режиме «online», что исключает возможность возникновения аварийных ситуаций.

Выводы:

1. Представлены особенности условий работы механического привода заготовочного стана «Слябинг 1150» и показано, что каждый из эксплуатационных параметров является недетерминированным, а, следовательно, в расчетах может рассматриваться только в вероятностной постановке.

2. По результатам статистических исследований показано, что суммарное влияние всех эксплуатационных параметров на надежность и долговечность элементов механического привода подчиняется нормальному закону распределения, а, следовательно, возможно использование принципа линейного суммирования повреждений.

3. Для диагностирования технического состояния зубчатых передач редуктора вертикальных валков стана «Слябинг 1150» предложен оценочный критерий в виде микротвердости активной поверхности зуба. Учитывая габаритные и весовые параметры редуктора и отдельных его элементов, другие традиционные неразрушающие виды контроля становятся неприемлемыми.

4. Представленные результаты лабораторных исследований материала фрагмента разрушенного зуба показали, что разрушение носит усталостный характер. Сравнение технических требований к детали согласочертежа с ее фактическими значениями показало их существенное различие, а, следовательно, необходимость учета влияния начальной твердости рабочей поверхности зуба, шероховатости его обработки, а также вязкости смазывающего масла при оценке скорости изменения микротвердости рабочей поверхности.

5. Для определения скорости изменения микротвердости рабочей поверхности зуба, которая может быть установлена только экспериментальным путем, предложен модифицированный ротатабельный

центральный композиционный план, который по сравнению с базовым, незначительно увеличивая число испытаний, позволяет существенно расширить информативность полученных результатов за счет возможности строить не только трехпараметрическую модель, но также и однопараметрические зависимости.

6. Проводя мониторинг микротвердости активной поверхности зубьев, которая изменяется во времени, а также выполняя сопоставительный анализ динамики рассматриваемого процесса становится возможным определять остаточный ресурс работы зубчатых зацеплений редуктора в режиме «online», а, следовательно, предотвращать их аварийные отказы.

Список литературы

1. Целиков А.И. Машины и агрегаты металлургических заводов /А.И. Целиков. – М.: Металлургия, 1988. – 680 с.
2. Динамика процессов прокатки /С.Л. Коцарь, В.А. Третьяков, А.Н. Цупров и др. – М.: Металлургия, 1999. – 255 с.
3. Разработка технологии производства горячекатаных полос толщиной 1,5 мм методом прямой транзитной прокатки по станам слябинг – НТЛС 1680 /В.Т. Тилик, О.Н. Штехно, А.Ю. Путнок и др. //Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2002. – Спецвыпуск. – С. 84–87.
4. ГОСТ 21354-87. Передачи зубчатые цилиндрические эвольвентные внешнего зацепления. Расчет на прочность. – Москва: Из-во стандартов, 1988. – 127 с.
5. Притыкин Д.П. Надежность, ремонт и монтаж металлургического оборудования /Д.П. Притыкин. – М.: Металлургия, 1985. – 368 с.
6. Анализ работы зубчатых передач и пути предупреждения их аварийных отказов на непрерывном тонколистовом стане горячей прокатки 1680 ПАО «Запорожсталь» /Ю.Д. Музыкин, С.В. Мацко, П.П. Москаленко, В.В. Татьков //Вісник НТУ «ХПІ», 2016. – № 30(1202). – С. 42–48.
7. Коднир Д.С. Контактная гидродинамика смазки деталей машин /Д.С. Коднир. – М.: Машиностроение, 1976. – 304 с.
8. Оценка остаточного ресурса крупномодульных зубчатых колес карьерных экскаваторов /С.Л. Иванов, И.Е. Звонарев, Д.И. Шишлянников и др. //Горное оборудование и электромеханика. – 2013. – № 11. – С. 28–33.
9. Исследование поверхностей твердости металла в областях повышенного износа и разрушения деталей горных машин /И.Е. Звонарев, С.Л. Иванов, Д.И. Шишлянников др. //Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2014. – С. 67–76.
10. Дисонсон Н. Статистика и планирование в технике /Н. Дисонсон, Ф. Лион. – М.: Мир, 1981. – 385 с.

References (transliterated)

1. Celikov A.I. Mashiny i agregaty metallurgicheskikh zavodov /A.I. Celikov. – Moscow: Metallurgiya, 1988. – 680 p.
2. Dinamika processov prokatki /S.L. Kocar, V.A. Tretyakov, A.N. Cuprov i dr. – Moscow: Metallurgiya, 1999. – 255 p.
3. Razrabotka tehnologii proizvodstva goryachekatanykh polos tolshinoj 1,5 mm metodom pryamoj tranzitnoj prokatki po stanah slyabing – NTLS 1680 /V.T. Tilik, O.N. Shtehno, A.Yu. Putnoki i dr. //Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost. – 2002. – Specvypusk. – P. 84–87.
4. GOST 21354-87. Peredachi zubchatye cilindricheskie evolventnye vneshnego zacepleniya. Raschet na prochnost. – Moscow: Iz-vo standartov, 1988. – 127 p.
5. Pritykin D.P. Nadezhnost, remont i montazh metallurgicheskogo oborudovaniya /D.P. Pritykin. – Moscow: Metallurgiya, 1985. – 368 p.
6. Analiz raboty zubchatykh peredach i puti preduprezhdeniya ih avariynnykh otkazov na nepreryvnom tonkolistovom stane goryachej prokatki 1680 PAO «Zaporozhstal» /Yu.D. Muzykin, S.V. Macko, P.P. Moskalenko, V.V. Tatkov //Visnik NTU "HPI", 2016. – No 30(1202). – P. 42–48.
7. Kodnir D.S. Kontaktnaya gidrodinamika smazki detalej mashin /D.S. Kodnir. – Moscow.: Mashinostroenie, 1976. – 304 p.
8. Ocenka ostatochnogo resursa krupnomodulnykh zubchatykh kolez karemykh ekskavatorov /S.L. Ivanov, I.E. Zvonarev, D.I. Shishlyannikov i dr. //Gornoe oborudovanie i elektromehaniika. – 2013. – No 11. – P. 28–33.
9. Issledovanie poverhnostej tverdosti metalla v oblastyakh povyshennogo iznosa i razrusheniya detalej gomnykh mashin /I.E. Zvonarev, S.L. Ivanov, D.I. Shishlyannikov dr. //Vestnik PNIPU. Geologiya. Neftegazovoe i gornoe delo. – 2014. – P. 67–76.
10. Disonson N. Statistika i planirovaniye v tehnikе /N. Disonson, F. Lion. – Moscow: Mir, 1981. – 385 p.

Поступила (received) 03.11.2019

Відомості про авторів /Сведения об авторах/ About the Authors

Музыкин Юрий Дмитриевич (Музикін Юрій Дмитрович, Muzykin Yuri Dmitrievich) – кандидат технических наук, профессор, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», профессор кафедры «Детали машин и мехатронных систем»; тел. +38-067-264-56-78; e-mail: muzykin1940@mail.ru

Гайдамака Анатолий Владимирович (Гайдамака Анатолій Володимирович, Gaydamaka Anatoli Vladimirovich) – доктор технических наук, профессор, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», профессор, заведующий кафедрой «Детали машин и мехатронных систем»; тел. +38-057-297-14-40; e-mail: gaydamaka.doc@gmail.com

Татьков Владимир Викторович (Татьков Володимир Вікторович, Tat'kov Vladimir Viktorovich) – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник научно-исследовательской части Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», тел. +38-067-735-87-09; e-mail: tatjkov@kpi.kharkov.ua

Рязанов Алексей Анатольевич (Рязанов Олексій Анатолійович, Ryazanov Alexey Anatolyevich) заместитель начальника по оборудованию обжимного цеха ПАО «Запорожсталь», г. Запорожье, тел. +38-067-723-42-60; e-mail: aleksey.ryazanov@zaporizhstal.com

УДК 620.179.16

К. Л. НОЗДРАЧОВА**ЄМНІСНІ СПОСОБИ ЗБУДЖЕННЯ ІМПУЛЬСІВ УЛЬТРАЗВУКОВИХ ХВИЛЬ В ЕЛЕКТРОПРОВІДНИХ ВИРОБАХ ПІД КУТОМ ДО ПОВЕРХНІ**

Розглянуті способи збудження ультразвукових об'ємних хвиль під кутом до поверхні електропровідного виробу і схеми їх практичної реалізації. Вони реалізуються за рахунок того, що на основі відомого способу безконтактного ємнісного збудження імпульсів ультразвукових об'ємних хвиль в поверхневому шарі металовиробу формують імпульсне високочастотне електричне поле заданої частоти і дію на той же поверхневий шар виробу постійним поляризуючим електричним полем. Постійне поляризує і високочастотне електричне поля формуються у поверхневому шарі виробу групою паралельних електродів розташованих з однаковою відстанню один відносно одного і на однаковій відстані від поверхні виробу. При цьому на кожний сусідній електрод подається постійне поляризує електричне поле протилежної полярності, а високочастотне електричне поле подається на всі електроди з однаковою фазою. За рахунок складання з однаковою фазою амплітуд поверхневих ультразвукових імпульсів, збуджених в локальних ділянках поверхні металовиробу, підвищується ефективність збудження високочастотних ультразвукових імпульсів під заданим кутом до поверхні виробу. Розроблені способи відносяться до техніки контролю якості матеріалів, виробів, обладнання тощо, більш конкретно, до техніки виявлення дефектів зварних швів ультразвуковими об'ємними хвилями з використанням ємнісного методу збудження ультразвукових імпульсів.

Ключові слова: ультразвуковий контроль, безконтактний перетворювач, ємнісний перетворювач, електричне поле, імпульси, вимірювання, діагностика, об'ємні хвилі.

Е. Л. НОЗДРАЧЕВА**ЕМКОСТНЫЕ СПОСОБЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ ИМПУЛЬСОВ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН В ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩИХ ИЗДЕЛИЯ ПОД УГЛОМ К ПОВЕРХНОСТИ**

Рассмотрены способы возбуждения ультразвуковых объемных волн под углом к поверхности электропроводящего изделия и схемы их практической реализации. Они реализуются за счет того, что на основе известного способа бесконтактного емкостного возбуждения импульсов ультразвуковых объемных волн в поверхностном слое металлоизделия формируют импульсное высокочастотное электрическое поле заданной частоты и действие на тот же поверхностный слой изделия постоянным поляризующим электрическим полем. Постоянное поляризующее и высокочастотное электрические поля формируются в поверхностном слое изделия группой параллельных электродов, расположенных с одинаковым расстоянием друг друга и на одинаковом расстоянии от поверхности изделия. При этом на каждый соседний электрод подается постоянное поляризующее электрическое поле противоположной полярности, а высокочастотное электрическое поле подается на все электроды с одинаковой фазой. За счет складывания с одинаковой фазой амплитуд поверхностных ультразвуковых импульсов, возбужденных в локальных участках поверхности металлоизделия, повышается эффективность возбуждения высокочастотных ультразвуковых импульсов под заданным углом к поверхности изделия. Разработанные способы относятся к технике контроля качества материалов, изделий, оборудования и т.п., более конкретно, к технике обнаружения дефектов сварных швов ультразвуковыми объемными волнами с использованием емкостного метода возбуждения ультразвуковых импульсов.

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

K. L. NOZDRACHOVA**CAPACITIVE METHODS OF EXCITATION OF PULSES OF ULTRASONIC WAVES IN ELECTRICALLY CONDUCTING PRODUCTS UNDER ANGLE TO THE SURFACE**

Methods of exciting ultrasonic volume waves at an angle to the surface of an electrically conductive product and their practical implementation are considered. They are realized due to the fact that, based on the known method of non-contact capacitive excitation of pulses of ultrasonic volume waves in the surface layer of a metal product, a pulsed high-frequency electric field of a given frequency is formed and a constant polarizing electric field acts on the same surface layer of the product. Constant polarizing and high-frequency electric fields are formed in the surface layer of the product by a group of parallel electrodes located at the same distance from each other and at the same distance from the surface of the product. In this case, a constant polarizing electric field of opposite polarity is supplied to each neighboring electrode, and a high-frequency electric field is supplied to all electrodes with the same phase. By folding the amplitudes of surface ultrasonic pulses excited in local sections of the surface of the metal product with the same phase, the efficiency of exciting high-frequency ultrasonic pulses at a given angle to the surface of the product increases. The developed methods relate to the quality control technique for materials, products, equipment, etc., more specifically, to the technique for detecting defects in welds by ultrasonic volume waves using the capacitive method of excitation of ultrasonic pulses.

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

Вступ. Неруйнівний контроль (НК) є найважливішим елементом системи експертизи промислової безпеки, що забезпечує технічну безпеку на небезпечному виробничому об'єкті. За останні роки НК, виконує важливу функцію у зазначеній системі, розвивається прискореними темпами в усіх своїх складових, включаючи розвиток нових методів і методик, створення більш досконалої техніки, що базується на досягненнях електроніки та обчислювальних пристроїв, підвищення вимог до персоналу в галузі НК. Розвиток ПК знайшов своє

відображення і в появі нових термінів, які використовуються в практиці, наукових працях і технічних описах. НК у все більшій мірі контактує із суміжними напрямками, які беруть участь в оцінці реального технічного стану об'єктів, визначенні можливості їх подальшої експлуатації і термінів безпечної роботи (проблема ресурсу). До таких напрямків відносяться металознавство, механіка руйнування (розрахунки міцності), теорія надійності та інші розділи науки і техніки. Все це сприяє появі в

© К. Л. Ноздрачова, 2019

області НК нових розробок, методів і відповідно нових понять [1, 2].

Постановка проблеми. Незважаючи на все зростаючий обсяг використання акустичних методів дефектоскопії для контролю електропровідних виробів, проблемам безконтактності цих методів, дослідженням підвищення їх достовірності, інформативності і т.п. присвячено відносно невелика кількість робіт. Тому, з огляду на згадані переваги, загальну тенденцію розвитку методів і засобів неруйнівного контролю, а також недостатню освітленість безконтактних ультразвукових методів, що не дозволяє реалізувати всі їхні переваги, є досить актуальним створення методу і програмно-апаратних засобів безконтактного акустичного неруйнівного контролю, що забезпечує високу продуктивність контролю, інформативність і достовірність результатів.

Мета роботи. Розробити і удосконалити нові типи ємнісних перетворювачів для контролю металовиробів акустичними методами неруйнівного контролю, що забезпечували б збудження імпульсів ультразвукових хвиль під кутом до поверхні об'єкту контролю.

Основна частина. Серед безконтактних акустичних методів НК слід виділити ємнісний, як найменш досліджений, але не менш перспективний і простий в реалізації [3, 4]. Принцип роботи якого полягає у формуванні в поверхневому шарі електропровідного металовиробу імпульсного високочастотного електричного поля заданої частоти і дію на той же поверхневий шар виробу постійним поляризованим електричним полем.

Суттєвим недоліком даного способу є те, що він не дозволяє збуджувати імпульси ультразвукових

хвиль під кутом до поверхні виробу, що контролюється.

Найбільш близьким за технічною суттю і за результатом до даного метода, є спосіб [5] який, за допомогою круглого електроду ємнісного ультразвукового перетворювача (ЄП), формує в поверхневому шарі електропровідного металовиробу імпульси високочастотного електричного поля заданої частоти і дію на той же поверхневий шар виробу постійним поляризованим електричним полем.

Суттєвим недоліком даного способу є також те, що при використанні круглого електроду в основному збуджуються поздовжні хвилі нормально поверхні, які не дозволяють контролювати якість металовиробів за наявності зварного ґрату. Тому, проблема забезпечення збудження імпульсів ультразвукових хвиль під кутом до поверхні об'єкту контролю (ОК) являється актуальною.

Для спрощення опису принципу роботи ємнісного перетворювача його можна представити у вигляді точкових джерел електричного поля. На рис 1 наведена пояснювальна схема принципу безконтактного випромінювання ультразвукових коливань (УЗК) в матеріал електропровідного виробу 1 від точкових джерел електричного поля 2, що знаходяться на відстані h від поверхні виробу і відстані a один від одного і їх «механічна» проекція 3 в поверхневому шарі матеріалу виробу, яка утворюється в результаті перетворення електричних сил в механічні. Стрілками вказані напрямки поширення УЗК, яке відбувається в різні сторони від джерел механічних напруг, має місце навіть деяка інтерференція хвиль. Тобто ті хвилі, що мають однакову частоту і фазу, за рахунок інтерференції, будуть складуватись в деякій точці виробу.

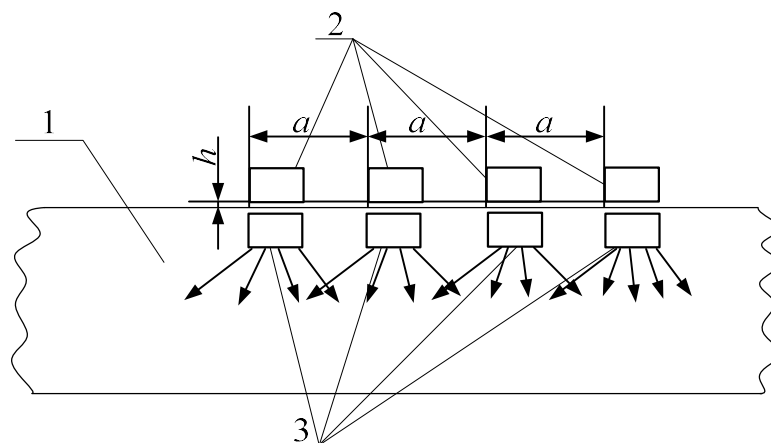


Рис.1 – Випромінювання УЗК у поверхневому шарі від точкових джерел сформованих електричним полем

На рис. 2 детально представлена схема принципу складання хвиль, що надійшли до точки 4 з однаковою фазою і частотою під заданим кутом β до виробу, за умовою, що відстань між точковими проекціями «механічних» джерел дорівнюватиме, або буде

кратною довжині хвилі λ . Отже, міняючи такі параметри як частота та відстань між джерелами електричного поля можна керувати кутом β випромінювання хвиль у виріб.

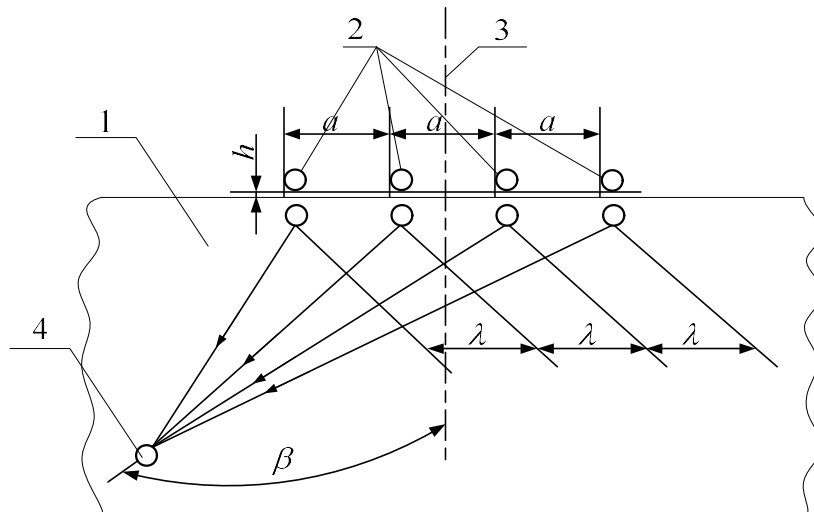


Рис.2 – Схема складання УЗК хвиль з однаковими фазами

З пояснень рис. 1 і 2, користуючись ефектом складання ультразвукових хвиль за фазою, розроблено спосіб збудження об'ємних ультразвукових хвиль під кутом до поверхні електропровідного ОК. Схема реалізації нового способу полягає в тому, що постійне поляризоване і височастотне електричне поле формуються у поверхневому шарі виробу групою паралельних електродів (рис.1) розташованих на однаковій відстані від поверхні виробу з однаковою відстанню a , величина якої визначається згідно з виразом

$$a = C / f \sin \beta, \quad (1)$$

де C – швидкість поширення ультразвукових об'ємних хвиль в матеріалі виробу, що контролюється, мм/мкс;

f – частота ультразвукових об'ємних коливань, які збуджуються у виробі, МГц;

β – кут між напрямком збуджуваних променів ультразвукових об'ємних хвиль і нормаллю до

поверхні виробу, який встановлюється нормативно-технічною документацією на контроль, град.

Спосіб реалізується наступним чином, рис.3. За допомогою електродів 1, розташованих на невеликій відстані h від поверхні ОК 5 та на відстані a один від одного, в ділянках 2 поверхні ОК 5 постійним електричним та імпульсним електричним полями збуджуються ультразвукові імпульси. При виконанні умов формули (1) під кутом β відносно нормалі 4 в об'єм ОК 5 поширюються пружні ультразвукові імпульси 3. При цьому, кут β можливо змінювати за рахунок регулювання частоти f імпульсного електромагнітного поля електронним шляхом.

Таким чином збудження ультразвукових імпульсів об'ємних хвиль під кутом до поверхні електропровідних виробів забезпечується за рахунок складання з однакою фазою амплітуд ультразвукових імпульсів в заданому напрямку.

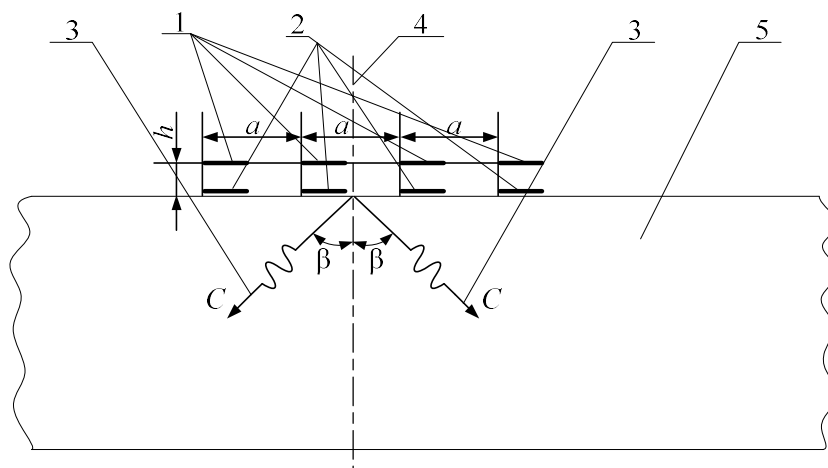


Рис.3– Схему принципу реалізації нового способу

На кресленні, рис. 4, наведено схему розміщення електродів над поверхнею ОК. Стрілками позначено

напрямки поширення ультразвукових об'ємних хвиль від електродів збудження в глибину ОК 5.

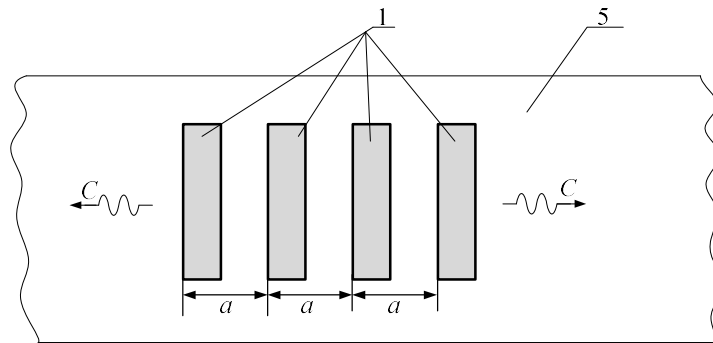


Рис. 4 – Схема розміщення електродів над поверхнею металовиробу

Для підвищення ефективності збудження височастотних ультразвукових імпульсів об'ємних хвиль запропоновано другий спосіб реалізації методу, вдосконалення якого забезпечується за рахунок оптимізації відстані між електродами ємнісного перетворювача, що зменшує взаємну компенсацію інтенсивності збуджуваних хвиль.

Спосіб реалізується наступним чином рис.5. На електроди 2 подається постійна поляризуюча електрична напруга з полярністю, що чередується відносно сусідніх електродів (+) або (-). На електроди 2 також подаються імпульси височастотної електричної напруги з однаковою фазою, як вказано в попередньому способі. В поверхневому шарі ОК 1 під електродами 2 формується періодичне ультразвукове поле з різними фазовими складовими, які формуються

за рахунок вибору відстані a між електродами згідно з виразом (1), де кут β встановлюється нормативно-технічною документацією на контроль (град.), та різною полярністю поляризуючої напруги на сусідніх електродах 2. Сумарне ультразвукове поле від усіх електродів 2 буде направлено в об'єм ОК 1 під кутом β відносно нормалі 3 до поверхні ОК 1. В результаті в ОК 1 буде виявлено внутрішній дефект Д. h – відстань між електродами 2 і поверхнею ОК 1

Окрім того, ультразвукове поле випромінюється в двох протилежних напрямках, що підвищує продуктивність контролю об'єму ОК 1.

Таким чином ефективність збудження височастотних ультразвукових імпульсів об'ємних хвиль в об'ємі виробу під заданим кутом підвищується.

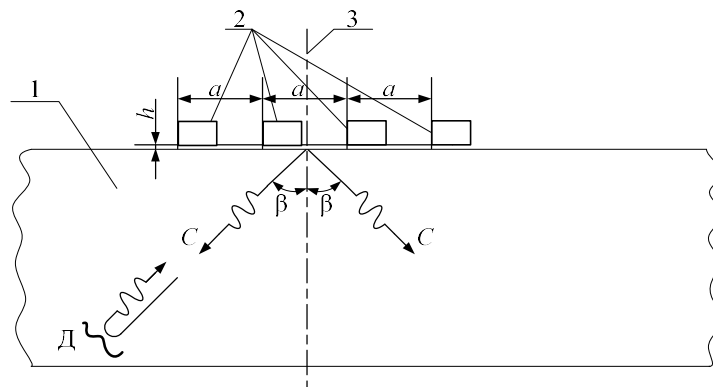


Рис.5 – Спрощена схему для пояснення принципу реалізації запропонованого способу

На рис. 6, наведено схему розміщення електродів над поверхнею ОК згідно з рис.5.

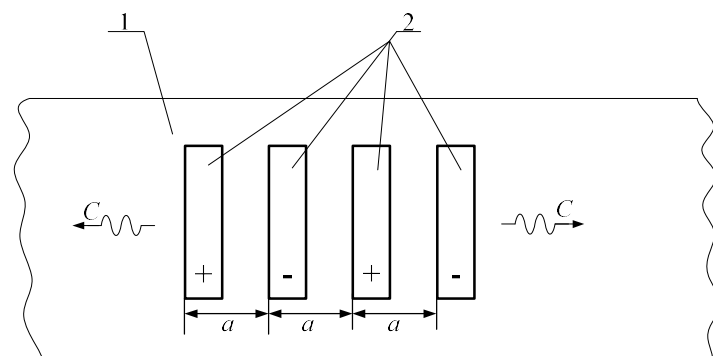


Рис. 6 – Схема розміщення електродів

Висновки.

1. На основі відомого безконтактного емнісного ультразвукового методу запропоновано способи збудження ультразвукових об'ємних хвиль під кутом до поверхні електропровідного виробу, детально описані схеми і принципи їх реалізації.

2. Визначено, що ефективність безконтактного збудження ультразвукових імпульсів в електропровідному виробі під кутом до поверхні забезпечується за рахунок складання з однаковою фазою амплітуд ультразвукових імпульсів в заданому напрямку.

Список літератури

1. Кочергин Д.А., Линдт Е.В. Преимущества и недостатки ультразвукового контроля. // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – Красноярск : СибГУ им. М.Ф. Решетнева, 2016. – Том 1. №12 – С. 430–432.
2. Можливість ультразвукового контролю зварних з'єднань без видалення фарбового покриття / Сучков Г.М., Єрошечков В.М., Мішанчук Е.В., Ноздрачова К.Л., Титова Н.В. // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків : НТУ «ХПІ», 2011. – Вип. 19. – С. 199–203.
3. Безконтактний емнісний спосіб збудження і прийому пружних хвиль / Сучков Г.М., Ноздрачова К.Л. // Методи та прилади контролю якості. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2013. – № 2(31). – С. 3–6
4. 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.
5. Ноздрачева Е.Л., Сучков Г.М., Петрищев О.Н. Особенности возбуждения ультразвуковых импульсов емкостным

преобразователем // Наукові праці Донецького національного технічного університету, серія: «Обчислювальна техніка та автоматизація». – 2015. – С.165–171.

References (transliterated)

1. Kocherhyn D.A., Lyndt E.V. Preymushchestva y nedostatky ul'trazvukovoho kontrolya. [Advantages and disadvantages of ultrasound control] // *Aktual'nye problemy avyatsyy y kosmonavtyky*. – Krasnoyarsk : SybHU im. M.F. Reshetneva, 2016. – Vol 1. – No 12 – P. 430–432.
2. Mozhylyvist' ul'trazvukovoho kontrolyu zvarnykh z'yednan' bez vydalennya farbavoho pokryttya [Possibility of ultrasonic control of welded joints without removal of paint coating] / Suchkov H.M., Yeroshchenkov V.M., Mishchanchuk E.V., Nozdrachova K.L., Tytova N.V. // *Visnyk NTU "KHPI"*. – Kharkiv : NTU "KHPI", 2011. – Vyp. 19. – P. 199–203.
3. Bezkontaktnyy yemnisnyy sposib zbudzhennya i pryomu pruzhnykh khvyl' [Non-contact capacitive method of excitation and reception of elastic waves] / Suchkov H.M., Nozdrachova K.L. // *Metody ta prylady kontrolyu yakosti*. – Ivano-Frankivs'k: IFNTUNH, 2013. – No 2(31). – P. 3–6
4. Nerazrushayushchy kontrol'. [Non-destructive testing]: Spravochnyk: V 7 t. Pod obshch. red. V.V. Klyueva. Vol. 3: Ul'trazvukovoy kontrol' / Y.N. Ermolov, YU.V. Lanhe. – Moscow.: Mashynostroenye, 2006. – 864 p.
5. Nozdracheva E.L., Suchkov H.M., Petryshchev O.N. Osobennosti vobzuzhdenyaya ul'trazvukovykh ympul'sov emkostnym preobrazovatelem [Features excitation of ultrasonic pulses capacitive transducer.] // *Naukovi pratsi Donets'koho natsional'noho tekhnichnoho universytetu, seriya: «Obchyslyval'na tekhnika ta avtomatyzatsiya»*. – 2015. – P. 165–171.

Надійшла (received) 06.06.19

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

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

В. І. НОСУЛЕНКО, В. М. ШМЕЛЬОВ, А. А. ПАЩЕНКО

ВПЛИВ ХАРАКТЕРУ ТЕЧІЇ РОБОЧОЇ РІДИНИ НА ЯКІСТЬ ОБРОБКИ В УМОВАХ РОЗМІРНОЇ ОБРОБКИ МЕТАЛІВ ЕЛЕКТРИЧНОЮ ДУГОЮ

В машинобудуванні для виготовлення навантажених деталей, спряжених пар, штампового інструменту все частіше використовують матеріали, що важко оброблюються обробкою різанням. Тому для виготовлення таких деталей використовуються методи фізико-технічної обробки такі як: електроерозійна обробка, електрохімічні методи обробки, лазерна обробка, плазмова обробка та інші. Спосіб розмірної обробки металів електричною дугою порівняно з традиційними процесами електророзрядної (електроіскрової обробки) забезпечує ряд переваг і отримує все більш широке практичне застосування. Проте порівняно з зазначеними традиційними процесами електроіскрової обробки якості обробленої поверхні за умов розмірної обробки електричною дугою, власне шорсткість, залишається все ще недостатньою визначеною і, звичайно, обмежується значеннями $Ra \geq 10$ мкм, що в свою чергу, обмежує область раціонального застосування способу. В цьому зв'язку розглянуто вплив характеру (режиму) течії робочої рідини в умовах розмірної обробки електричною дугою на якість обробки, що дозволило покращити шорсткість обробленої поверхні до $Ra 2,5$ мкм. Зі збільшенням числа Рейнольдса течія втрачає стійкість і ламінарний рух перетворюється на турбулентний. У потоці рідини виникає перемішування, біля його меж утворюються вихори. Турбулентний рух не буває усталеним, тому кажуть про миттєву місцеву швидкість у точці потоку, де вона змінюється як за величиною, так і за напрямом. Відповідно змінюється динамічний тиск потоку, що впливає на інший показник процесу обробки, зокрема погіршується шорсткість обробленої поверхні. Тому необхідною умовою для забезпечення високої якості обробленої поверхні, зокрема її шорсткості, є рівномірна, ламінарна течія робочої рідини в зоні формоутворюючої кромки електрод-інструмента. З цією метою запропоновані технологічні рішення, які забезпечують в зоні обробки схему нерівномірного стиснення робочої рідини, що дозволяє отримати ламінарний рух робочої рідини і отримувати необхідну якість обробленої поверхні.

Описано вплив характеру режиму течії робочої рідини на якість обробки в умовах розмірної обробки електричною дугою. Показано, що необхідною умовою забезпечення високої якості обробленої поверхні, зокрема її шорсткості, є рівномірна, ламінарна течія робочої рідини в зоні формоутворюючої кромки електрод-інструмента. Описано технічне рішення за умов реалізації процесу розмірної обробки електричною дугою, що забезпечують якість обробленої поверхні, власне шорсткості, до $Ra 2,5$ мкм.

Ключові слова: електрична дуга, шорсткість обробленої поверхні, електрод-інструмент, робоча рідина, гідродинаміка процесу розмірної обробки електричною дугою.

В. И. НОСУЛЕНКО, В. Н. ШМЕЛЕВ, А. А. ПАЩЕНКО

ВЛИЯНИЕ ХАРАКТЕРА ТЕЧЕНИЯ РАБОЧЕЙ ЖИДКОСТИ НА КАЧЕСТВО ОБРАБОТКИ В УСЛОВИЯХ РАЗМЕРНОЙ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГОЙ

В машиностроении для изготовления нагруженных деталей, сопряженных пар, штампового инструмента все чаще используют материалы, которые трудно обрабатываются обработкой резанием. Поэтому для изготовления таких деталей используются физико-технические методы обработки такие как: электроэрозионная обработка, электрохимические методы обработки, лазерная обработка, плазменная обработка и другие. Способ размерной обработки металлов электрической дугой по сравнению с традиционными процессами электроразрядной (электроискровой обработки) обеспечивает ряд преимуществ и получает все более широкое практическое применение. Однако по сравнению с указанными традиционными процессами электроискровой обработки качество обработанной поверхности в условиях размерной обработки электрической дугой, собственно шероховатость, остается все еще недостаточно определенной и, обычно, ограничивается значениями $Ra \geq 10$ мкм, что в свою очередь, ограничивает область рационального применения способа. В этой связи рассмотрено влияние характера (режима) течения рабочей жидкости в условиях размерной обработки электрической дугой на качество обработки, что позволило улучшить шероховатость обработанной поверхности до $Ra 2,5$ мкм. С увеличением числа Рейнольдса поток теряет устойчивость и ламінарное движение превращается в турбулентное. В потоке жидкости возникает перемешивание, у его границ образуются вихри. Турбулентное движение не бывает устойчивым, поэтому говорят о мгновенной местной скорости в точке потока, где она меняется как по величине, так и по направлению. Соответственно меняется динамическое давление потока, которое влияет на другие показатели процесса обработки, в частности ухудшается шероховатость обработанной поверхности. Поэтому необходимым условием для обеспечения высокого качества обработанной поверхности, в частности ее шероховатости, является равномерное, ламінарное течение рабочей жидкости в зоне формообразующие кромки электрода-инструмента. С этой целью предложены технологические решения, которые обеспечивают в зоне обработки схему всестороннего неравномерного сжатия рабочей жидкости, что позволяет получить ламінарное движение рабочей жидкости и получать необходимое качество обработанной поверхности.

Описано влияние характера режима течения рабочей жидкости на качество обработки в условиях размерной обработки электрической дугой. Показано, что необходимым условием обеспечения высокого качества обработанной поверхности, в частности ее шероховатости, является равномерное, ламінарное течение рабочей жидкости в зоне формообразующие кромки електрод-інструмента. Описаны техническое решение в условиях реализации процесса размерной обработки электрической дугой, обеспечивающих качество обработанной поверхности, собственно шероховатости, до $Ra 2,5$ мкм.

Ключевые слова: электрическая дуга, шероховатость обработанной поверхности, электрод-инструмент, рабочая жидкость, гидродинамика процесса размерной обработки электрической дугой.

V. I. NOSULENKO, V. N. SHMELYOV, A. A. PASHCHENKO

INFLUENCE OF THE CHARACTER OF THE FLOW OF THE WORKING LIQUID ON THE QUALITY OF PROCESSING IN THE CONDITIONS OF DIMENSIONAL PROCESSING OF METALS BY AN ELECTRIC ARC

In mechanical engineering, materials that are difficult to process by cutting are increasingly being used for the manufacture of loaded parts, mating pairs, stamping tools. Therefore, for the manufacture of such parts, physicochemical processing methods are used such as: electroerosion processing, electrochemical processing methods, laser processing, plasma processing and others. The method of dimensional processing of metals by an electric arc in comparison with traditional processes of electric discharge (spark treatment) provides a number of advantages and is gaining wider practical application. However, in comparison with the indicated traditional processes of electric spark treatment, the quality of the treated surface under dimensional machining by an electric arc, the roughness proper, is still not sufficiently defined and, usually, is limited to $Ra \geq 10$ μ m, which in turn

limits the area of rational application of the method. In this regard, the influence of the nature (mode) of the flow of the working fluid under the conditions of dimensional processing by an electric arc on the quality of processing is examined, which made it possible to improve the roughness of the treated surface to $Ra\ 1.6\ \mu\text{m}$. With an increase in the Reynolds number, the flow loses stability and the laminar motion turns into a turbulent one. Mixing occurs in the fluid flow, and vortices form at its boundaries. Turbulent motion is not stable, therefore speak of instantaneous local speed at the point of flow, where it varies both in magnitude and direction. Accordingly, the dynamic pressure of the flow changes, which affects other indicators of the processing process, in particular, the roughness of the treated surface is deteriorated. Therefore, a necessary condition for ensuring the high quality of the treated surface, in particular its roughness, is a uniform, laminar flow of the working fluid in the zone of the forming edges of the electrode-tool. To this end, technological solutions have been proposed that provide a scheme of comprehensive non-uniform compression of the working fluid in the processing zone, which makes it possible to obtain the laminar motion of the working fluid and obtain the required quality of the treated surface. The influence of the nature of the flow regime of the working fluid on the quality of processing under conditions of dimensional processing by an electric arc is described. It is shown that a necessary condition for ensuring the high quality of the treated surface, in particular its roughness, is a uniform, laminar flow of the working fluid in the zone of the an forming edges of the electrode-tool. The technical solution is described in terms of the implementation of the process of dimensional processing by an electric arc, ensuring the quality of the processed surface up to $Ra\ 1.6\ \mu\text{m}$.

Key words: electric arc, roughness of the processed surface, electrode-tool, working fluid, hydrodynamics of the process of dimensional machining by an electric arc

Вступ. В машинобудуванні для виготовлення навантажених деталей, спряжених пар, штампного інструменту, зокрема спряжених пар пуансонів і матриць розділових штампів [1], все частіше використовують матеріали, що важко оброблюються обробкою різанням. Тому для виготовлення таких деталей використовуються методи фізико-технічної обробки такі як електроерозійна обробка, електрохімічні методи обробки, лазерна обробка, плазмова обробка та інші. Лазерну і плазмову обробку переважно застосовують для обробки листових деталей, електроерозійну обробку – для об'ємних деталей. Кожен з цих методів має свою область раціонального застосування, переваги та недоліки.

Спосіб розмірної обробки металів електричною дугою (РОД) [2] порівняно з традиційними процесами електророзрядної (електроіскрової обробки) забезпечує ряд переваг і отримує все більш широке практичне застосування [3, с. 8–18]. Проте порівняно з зазначеними традиційними процесами електроіскрової обробки якість обробленої поверхні за умов РОД, власне шорсткість, залишається все ще недостатньою визначеною і, звичайно, обмежується значеннями $Ra \geq 10\ \mu\text{m}$, що в свою чергу, обмежує область раціонального застосування способу. В цьому зв'язку розглянемо вплив характеру (режиму) течії робочої рідини в умовах РОД на якість обробки, що дозволить покращити шорсткість обробленої поверхні до $Ra\ 2,5\ \mu\text{m}$.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Згідно діючих уявлень, фізична модель процесу РОД [1, с.16] описується співвідношенням:

$$y = kI^\alpha P_d^\beta, \quad (1)$$

де y – будь-який фізико-технологічний показник (характеристика) процесу, наприклад продуктивність, шорсткість, глибина зони термічного впливу;

k – коефіцієнт розмірності;

I – сила струму, приймають в межах від декількох ампер до декількох тисяч ампер, визначає продуктивність обробки і по суті відображає кількісну сторону процесу;

P_d – динамічний тиск потоку, приймають від $1 \dots 2\ \text{кПа}$ до $1\ \text{МПа}$ і більше, визначає якість обробки (шорсткість, глибину зони термічного впливу, точність) і відображає якісну сторону процесу;

α і β – показники ступеня для різних технологічних характеристик.

За цих умов електричну дугу треба розглядати [3, с. 10–13] як суму трьох самостійно діючих джерел тепла в катодній області, анодній області і стовпі дуги. При цьому катодне джерело тепла розташовано в плоскому шару на поверхні катода, анодне джерело тепла – в плоскому шару на поверхні анода, а стовп дуги є об'ємним джерелом тепла. Катодне джерело тепла здійснює ерозію катода, анодне джерело тепла здійснює ерозію анода, стовп дуги на ерозію електродів помітно не впливає, проте визначає енергетичні процеси, а отже, якісні характеристики джерел тепла на електродах. Можливість і якісна сторона процесу РОД визначаються, таким чином, якісними характеристиками (якістю) джерел тепла на електродах, зокрема, об'ємною густиною теплової потужності, яка, в свою чергу визначається густиною струму і напруженістю електричного поля відповідно на ділянках катодного і анодного джерел тепла. Порівняльні кількісні та якісні характеристики джерел тепла на катоді і аноді, в свою чергу, дозволяють судити про полярність електричної ерозії.

За візуальними оцінками, оброблена РОД поверхня являє собою сукупність великого числа лунок, що підтверджує дискретний характер руйнування металу, а також те, що інтегральний ерозійний ефект створюється сукупністю слідуєчих один за одним елементарних ерозійних актів. Лунки частіше розташовують в певній послідовності і утворюють сліди від розряду, звичайно в напрямку протікання рідини, що свідчить про закономірності переміщення розряду по поверхні електродів. Оскільки сліди часто перериваються в одному місці і з'являються в іншому, можна казати про дію вибіркового механізму процесу ерозії.

Таким чином електроерозійний процес в умовах РОД характеризується безперервним підведенням енергії в зону обробки, безперервним протіканням розряду і безперервним існуванням джерел тепла на електродах. Отже безперервно є теплова дія розряду на електроди і безперервно протікає процес ерозії. Проте, згідно викладеного, фізична природа існування стаціонарної електричної дуги передбачає дискретний характер її переміщення по поверхні електродів (дуга після деякого встоювання на місці переміщується на іншу ділянку), а отже, перерваний, дискретний характер процесу ерозії, що є безумовною властивістю дуги.

Отже, можливості та якісні і кількісні характеристики процесу РОД визначається якісними характеристиками (якістю) джерел тепла на електродах, перш за все, об'ємною густиною теплової потужності. Остання, в свою чергу, визначається динамічним тиском потоку робочої рідини, а також, в відомих межах, полярністю електродів. В зв'язку з цим є можливим легко (за рахунок регулювання швидкості потоку робочої рідини) керувати якістю джерел тепла на електрода, а отже і якістю процесу ерозії, здійснюючи обробку незалежно від струму в широкому діапазоні режимів, починаючи від грубого розмірного плавлення і аж до превалюючого тонкого випаровування [4].

Приймаємо також до уваги, що електрична дуга являє собою «ідеальну» саморегульовану систему, що знаходиться з зовнішнім середовищем в рухомій рівновазі. Щоб переконатися в цьому достатньо проаналізувати осцилограму сили струму і напруги будь-якої дуги [5, с. 10]. Число механізмів саморегулювання дуги практично необмежена. Тому електрична дуга невичерпна в формах свого прояву, невичерпні також її технологічні можливості. Тому можна говорити про необмежені можливості управління властивостями дуги як джерела енергії для різних цілей науки і практики за рахунок зміни умов протікання розряду. В цьому зв'язку суттєвим є вплив на енергетичні, а отже і технологічні характеристики дуги, характеру (режиму) течії робочої рідини, який як відомо, може бути як ламінарним, так і турбулентним і який не може не впливати на якість обробленої поверхні, зокрема її шорсткість.

Постановка завдання. Зі збільшенням числа Рейнольдса, як відомо, течія втрачає стійкість і ламінарний рух перетворюється на турбулентний [6]. У потоці рідини виникає перемішування, біля його меж утворюються вихори. Частинки рідини в турбулентному потоці внаслідок вихроутворення перебувають у складному, невпорядкованому русі. Турбулентний рух не буває усталеним, тому кажуть про миттєву місцеву швидкість у точці потоку, де вона змінюється як за величиною, так і за напрямом. Відповідно змінюється P_d , а отже, згідно виразу (1), змінюється будь-який інший показник. Електрична дуга за цих умов, як ідеально саморегульована система, знаходиться з таким потоком в рухомій, хиткій рівновазі, і її енергетичні, а отже і технологічні характеристики, стають недостатньо керованими, а якість обробленої поверхні, зокрема шорсткість, погіршується. За цих умов загальний висновок: необхідною умовою забезпечення високої якості обробленої поверхні, зокрема її шорсткості, є рівномірна, ламінарна течія робочої рідини в зоні формують кромки електрод-інструмента.

Виклад основного матеріалу. В цьому зв'язку опишемо для технологічних схем формоутворення по принципу прошивання як по внутрішньому, так і зовнішньому контурах для отримання отворів і стержнів технологічні прийоми, які забезпечують рівномірну, ламінарну течію робочої рідини в зоні

обробки, а отже і високу якість обробленої поверхні, власне, високі показники шорсткості.

Рідину розглядають як суцільне середовище. Тому її течію і рівновагу можна розглядати, не враховуючи механізмів молекулярного руху, тобто припускаючи, що в рідинах усі процеси залежать від зовнішніх сил, під дією яких виникають відповідні внутрішні сили [7, с. 37–38]. В таких випадках можна розглядати напружений стан рухомої рідини у вигляді так званих схем напруженого стану, зокрема, таких як розтягування чи стиснення. Рідина не чинить опору розтягальним зусиллям і наявність такої сили перетворює ламінарний рух в турбулентний. Що ж до схеми всебічного нерівномірного стиснення, то вона попереджає перемішування та вихроутворення робочої рідини, забезпечує її щільність і, в кінцевому підсумку, перетворює турбулентний рух в ламінарний, що за умов процесу РОД, відповідно, забезпечує високу якість обробленої поверхні, власне шорсткість.

В цьому зв'язку для технологічних схем формоутворення по принципу прошивання як по внутрішньому, так і зовнішньому контурах нами запропоновано, технологічний прийом, який полягає в тому, що дуга горить в потоці робочої рідини, за умов забезпечення її напруженого стану, що відрізняється схемою всебічного нерівномірного стиснення рідини, за рахунок створення додаткового гідродинамічного опору на виході з міжелектродного зазору, наприклад, у вигляді протитиску в магістралі зливу робочої рідини, що попереджує пульсацію робочої рідини і її турбулентність в зоні обробки та забезпечує рівномірну, ламінарну течію робочої рідини і, отже, як наслідок, покращується якість обробленої поверхні, власне, зменшується її шорсткість.

На рис. 1 зображена схема формоутворення отвору 1 в заготовці 2 електрод-інструмента (ЕІ) 3 при прокачуванні робочої рідини під тиском P_0 в напрямку від периферії ЕІ до його центра і надалі на злив, та за умов, наявності протитиску P_{np} в магістралі зливу, що забезпечує схему всебічного нерівномірного стиснення робочої рідини в зоні обробки і, як наслідок, попереджає пульсацію робочої рідини та забезпечує її рівномірну, ламінарну течію, що покращує якість обробленої поверхні, власне шорсткість.

На рис. 2 зображена схема формоутворення стержня 1 в заготовці 2 ЕІ 3 при прокачуванні робочої рідини під тиском P_0 в напрямку від центра ЕІ до його периферії і надалі на злив, та за умов, наявності протитиску P_{np} в магістралі зливу, що забезпечує схему всебічного нерівномірного стиснення робочої рідини в зоні обробки і, як наслідок, попереджає пульсацію робочої рідини та забезпечує її рівномірну ламінарну течію, що покращує якість обробленої поверхні, власне шорсткість.

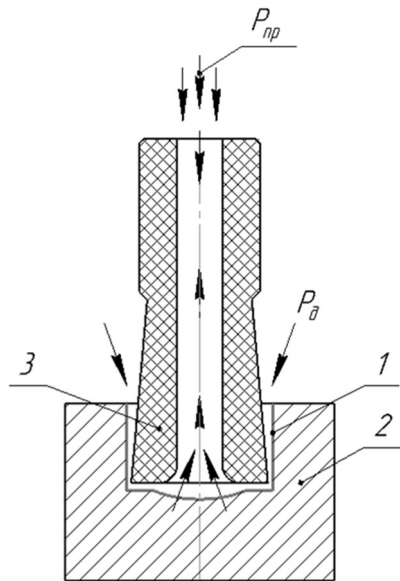


Рис. 1 – Схема формоутворення чистої обробки по внутрішньому контуру

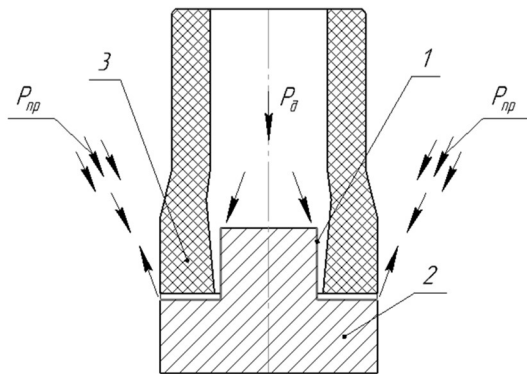


Рис. 2 – Схема формоутворення чистої обробки по зовнішньому контуру

За значених умов обробки при відсутності протитиску $P_{пр}$ отримано шорсткість обробленої поверхні $Ra\ 10\ \mu\text{м}$, а за умов обробки при наявності протитиску $P_{пр} = 0,3\ \text{МПа}$ отримано шорсткість $Ra\ 3,2\ \mu\text{м}$.

Опосередкованою схемою всебічного нерівномірного стиснення в зоні формоутворюючої кромки ЕІ для прошивних операцій реалізована відомим технічним рішенням [4]. Для цього запропоновано використати ЕІ з нахиленою входною робочою поверхнею $\alpha \geq 0^{\circ}30'$ (рис. 3). Це забезпечує течію робочої рідини в звужену щілину і, як наслідок, на цій ділянці забезпечується ламінарний характер течії робочої рідини за рахунок її всебічного нерівномірного стиснення.

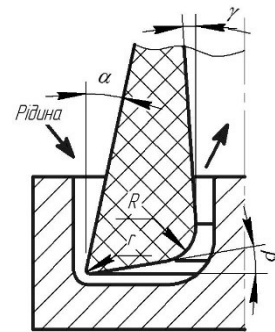


Рис. 3 – Формоутворююча кромка електрод-інструмента

Керованість процесу, а отже і якість обробки, зростають при скороченні траси течії робочої рідини в зоні обробки, оскільки при збільшенні останньої (траси) різко зростає вірогідність порушень рівномірної течії робочої рідини. В цьому зв'язку запропоновано технічне рішення [8], коли обробку здійснюють за два переходи, а саме: за перший перехід обробку здійснюють, залишаючи односторонній припуск на подальшу обробку в межах $1...3\ \text{мм}$ при струмі обробки в межах $300...500\ \text{А}$ і статичного тиску робочої рідини $0,8\ \text{МПа}$; за другий перехід здійснюють чистову остаточну обробку за рахунок видалення зазначеного припуску при електричному струмі обробки $50...200\ \text{А}$ та статичному тиску робочої рідини $2,5\ \text{МПа}$, приймаючи до уваги, що чим менше припуск на подальшу обробку, чим менше струм обробки та чим вище статичний тиск робочої рідини, тим менша шорсткість обробленої поверхні, яка коливається в межах $Ra\ 10$ до $Ra\ 2,5\ \mu\text{м}$.

Високоєфективним є технічне рішенням [8], коли описані технологічні переходи обробки здійснюють з використанням одного ЕІ, що дозволяє виконувати чорнову і чистову обробку за один технологічний перехід (рис. 4). При використанні такого ЕІ в зоні чистої обробки довжина траси течії робочої рідини складає $1...3\ \text{мм}$ (припуск Z), що гарантовано забезпечує оптимальні умови течії робочої рідини (ламінальний рух).

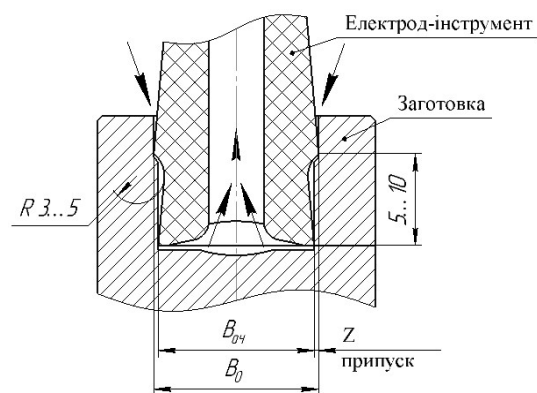


Рис. 4 – Електрод-інструмент з двома робочими кромками

Висновки. Описано вплив характеру режиму течії робочої рідини на якість обробки в умовах РОД. Показано, що необхідною умовою забезпечення

високої якості обробленої поверхні, зокрема її шорсткості, є рівномірна, ламінарна течія робочої рідини в зоні формуючої кромки ЕІ. Описано технічне рішення за умов реалізації процесу РОД, що забезпечують якість обробленої поверхні, власне шорсткості, до Ra 2,5 мкм.

Список літератури

1. Шмельов В.М. Оптимізація якісних характеристик поверхонь робочих деталей розділових штампів в умовах розмірної обробки електричною дугою / В.М. Шмельов // Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. «Конструювання, виробництво та експлуатація с/г машин». Випуск № 44. Кіровоград, КНТУ, 2014. – С.170–176.
2. Носулєнко В. І. Розмірна обробка металів електричною дугою: Автореф. дис. д-ра техн. наук: 05.03.07. / В.І. Носулєнко. – Кіровоградський держ. техн. ун-т. – К., 1999. – 32 с.
3. Носулєнко В.І. Размерная обработка металлов электрической дугой/ В.И. Носулєнко // *Электронная обработка металлов*. Кишенев, 2005, №1. – С. 8–17.
4. Носулєнко В.І. О качестве источников тепла на электродах в условиях процесса размерной обработки электрической дугой / В.И. Носулєнко, В.Н.Шмельов // Научно-теоретический и практический журнал "Оралдын ғылым жаршысы". Серия "Технические науки. Физика. Современные информационные технологии". – № 8 (87) – Казахстан – 2014. – С. 61–68.
5. Носулєнко В.І. О физической природе, общем, отличиях и технических возможностях электрических разрядов и классификации электроразрядной обработки/ В.И. Носулєнко // *Электронная обработка металлов*. Кишенев, 2006, №1. – С. 8–18.
6. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / Под ред. М. О. Штейнберга. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.; Машиностроение, 1992. – 672 с: ил.
7. Грабовський О.М., Цабієв О.М. *Гідравліка і нагнітачі: Навчальний посібник*. К.: НМК ВО, 1992. – 310 с.
8. Носулєнко В.І. Вплив фізико-технологічних характеристик процесу розмірної обробки металів електричною дугою на якість обробки / В.І. Носулєнко, В.М. Шмельов, А.А. Пашенко // *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: *Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії: зб. наук. пр. / Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т»*. – Харків : НТУ «ХПІ», 2018. – № 31 (1307) 2018. – С.61-66 – ISSN 2519-2671.

References

1. Shmel'ov V. M. Opty'mizatsiya yakisny'x karaktery'sty'k poverxon' robochy'x detalej rozdilovy'x shtampiv v umovax rozmirnoyi obrobky' elektry'chnoyu dugoyu [Optimizing the quality characteristics of the surfaces working details dividing of

stamps in the conditions dimensional processing by electric arc]. *Zagal' noderzhavny'j mizhvidomchy'j naukovy' tekhnichny'j zbirny'k*. – National interdepartmental scientific and technical collection. "Design, manufacture and operation of agricultural machines" "Konstruyuvannya, vy'robny'ctvo ta ekspluatatsiya s/g mashy'n". Kirovohrad, 2014, vol. 4, pp.170–176.

2. Nosulenko V. I. *Rozmirna obrobka metaliv elektrychnoyu dugoyu: avtoref. dis. na zbuduttya nauk. stupenya d-ra tekhn. nauk 05.03.07 "Protsesty fizyko-tekhnichnoi obrobky"* [Size machining of metals by electric arc. Abstract of a thesis dr. eng. sci. diss. 05.03.07 "The process of physical-technical processing"]. Kyiv, 1999. 32 p.
3. Nosulenko V. I. *Razmernaja obrabotka metallov jelektricheskoy dugoy* [Size machining of metals by electric arc *Jelektronnaja obrabotka metallov – Electronic metal processing*. Kishenev, 2005, vol. 1, – pp. 8–17.
4. Nosulenko V. I. & Shmelev V. N. O kachestve istochnikov tepla na elektrodakh v usloviyakh protsesta razmernoy obrabotki elektricheskoy dugoy [On the quality of heat sources at the electrodes under the conditions of dimensional processing the electric arc]. *Nauchno-teoreticheskiy i prakticheskiy zhurnal "Oraldyn ғылым жаршысы". Seriya "Tekhnicheskie nauki. Fizika. Sovremennye informatsionnye tekhnologii"*. "Oral kalasi" – Scientific-theoretical and practical journal "Scientific-research organization". A series of "Technical Sciences. Physics and Modern Information Technologies". Kazakhstan, 2014, vol. 8 (87), pp. 61–68.
5. Nosulenko V. I. O fizicheskoy prirode, obshhem, otlichijah i tehnicheskikh vozmozhnostyah jelektricheskikh rozrjadov i klassifikatsii jelektrorazrjadnoj obrabotki [On the physical nature, general differences and technical capabilities of electrical discharges and the classification of electrical discharge processing]. *Jelektronnaja obrabotka metallov – Electronic metal processing*. Kishenev, 2006, vol. 1, pp. 8–18.
6. Idelchik I. Ye. *Reference book on hydraulic resistance*. (M. O. Shteynberga Ed.). (3d ed.). Moscow, Mashinostroenie 1992. 672 p.
7. Grabovskiy O. M., Tsabiev O. M. *Gidravlika i nagnitachi: Navchalnyy posibnik* [Hydraulics and Superchargers: A Tutorial]/ KiYiv.: NMK VO, 1992. – 310 p.
8. Nosulenko V. I. Shmel'ov V. M., Pashchenko A. A. Vpliv flziko-tehnologichnih karakteristik protsesu rozmirnoyi obrobki metaliv elektrychnoyu dugoyu na yakist obrobki [Influence of physical and technological characteristics of the process of dimensional machining of metals by an electric arc on quality of processing]. *Visnik Natsionalnogo tehniknogo unversitetu «HPi»*. Seriya: *Innovatsyni tehnologiyi ta obladnannya obrobki materlalliv u mashinobuduvanni ta metalurgiyi* [Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy], Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2018, No.31 (1307), pp. 61–66.

Надійшла (received) 08.11.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Носулєнко Віктор Іванович (Носулєнко Виктор Иванович, Nosulenko Viktor Ivanovich) – доктор технічних наук, професор, Центральноукраїнський національний технічний університет, завідувач кафедри обробки металів тиском та спецтехнологій; м. Кропивницький, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5376-6171>; e-mail: nosulenko.wi@gmail.com

Шмельов Віталій Миколайович (Шмелев Виталий Николаевич, Shmelyov Vitaliy Nikolaevich) – кандидат технічних наук, доцент, Центральноукраїнський національний технічний університет, доцент кафедри обробки металів тиском та спецтехнологій; м. Кропивницький, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2567-9980>; e-mail: ShmelyovVM@gmail.com

Пащенко Андрій Араратович (Пащенко Андрей Араратович, Paschenko Andrey Araratovich) – Центральноукраїнський національний технічний університет, аспірант кафедри обробки металів тиском та спецтехнологій; м. Кропивницький, Україна; e-mail: pashchenko_andryushka@ukr.net

УДК 621.771.63

Ю. А. ПЛЕСНЕЦОВ**ОБЕСПЕЧЕНИЕ УСТОЙЧИВОГО ПРОЦЕССА ПОШТУЧНОЙ ФОРМОВКИ СПЕЦИАЛЬНЫХ ГНУТЫХ ПРОФИЛЕЙ**

При поштучном изготовлении специальных несимметричных профилей на профилегибочных станах возможны их винтообразное скручивание, продольный изгиб, изменение основных размеров сечения по длине. Известен ряд схем и способов формовки в валках профилегибочных станков, направленных на предупреждение и устранение этих дефектов. Наиболее широкое применение нашли способы, предусматривающие уравнивание изгибающих моментов, необходимых для подгибки полок. Однако они обеспечивают положительные результаты только при непрерывном процессе профилирования. При поштучном процессе, который в начале и конце формовки каждой заготовки протекает неустойчиво, их применение не гарантирует отсутствие указанных дефектов. Кроме того, наблюдается поперечное смещение профилей в калибрах валков, на входе в них и в вертикальных роликах между клетями. Для обеспечения устойчивого процесса формовки, предупреждения продольного изгиба и скручивания профилей и их поперечного смещения в калибре необходимо одновременное начало контакта с валками, по крайней мере, двух участков переднего конца профиля, размещенных по разные стороны от центра тяжести его поперечного сечения. Такой контакт с горизонтальными валками рабочих клетей целесообразно обеспечивать на кромках.

Ключевые слова: валковая формовка, профиль гнутый специальный, поштучный процесс, обеспечение устойчивости процесса.

Ю. О. ПЛЕСНЕЦОВ**ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТАЛОГО ПРОЦЕСУ ПОШТУЧНОГО ФОРМУВАННЯ СПЕЦІАЛЬНИХ ГНУТИХ ПРОФІЛІВ**

При поштучному виготовленні спеціальних несиметричних профілів на профілезгинальних станах можливі їх гвинтоподібне скручування, поздовжній вигин, зміна основних розмірів перетину по довжині. Відомий ряд схем і способів формування в валках профілезгинальних станів, спрямованих на попередження та усунення цих дефектів. Найбільш широке застосування знайшли способи, що передбачають урівноваження згинаючих моментів, необхідних для підгинання полиць. Однак вони забезпечують позитивні результати тільки при безперервному процесі профілювання. При поштучному процесі, який на початку і кінці формування кожної заготовки протікає нестійко, їх застосування не гарантує відсутність зазначених дефектів. Крім того, спостерігається поперечне зміщення профілів в калібрах валків, на вході в них і в вертикальних роликах між клітьми. Для забезпечення сталого процесу формування, попередження поздовжнього вигину і скручування профілів і їх поперечного зсуву в калібрі необхідне забезпечення одночасного початку контакту з валками, у крайньому разі, двох ділянок переднього кінця профілю, розміщених по різні боки від центру ваги його поперечного перерізу. Такий контакт з горизонтальними валками робочих клітей доцільно забезпечувати на крайках.

Ключові слова: валкове формування, профіль гнутий спеціальний, поштучний процес, забезпечення сталості процесу.

YU. A. PLESNETSOV**SUSTAINING A SUSTAINABLE PIECE PROCESS FORMING SPECIAL BENT PROFILES**

In the case of single-piece production of special asymmetric profiles on roll forming mills, their helical twisting, longitudinal bending, and changing the main dimensions of the section along the length are possible. A number of known schemes and methods of forming in rolls of roll forming mills aimed at preventing and eliminating these defects. The most widely used are methods for balancing the bending moments necessary for folding shelves. However, they provide positive results only with a continuous profiling process. When the piece process, which at the beginning and end of the molding of each workpiece is unstable, their use does not guarantee the absence of these defects. In addition, there is a transverse displacement of the profiles in the calibers of the rolls, at the entrance to them and in the vertical rollers between the stands. To ensure a stable molding process, to prevent longitudinal bending and twisting of the profiles and their lateral displacement in the gauge, it is necessary to simultaneously start contact with the rolls of at least two sections of the front end of the profile located on different sides from the center of gravity of its cross section. It is advisable to provide such contact with the horizontal rolls of the working stands at the edges.

Key words: roll forming, special bent profile, single-piece process, ensuring process stability.

Введение. Известно, что при изготовлении несимметричных профилей на профилегибочных станах возможны их винтообразное скручивание, продольный изгиб, изменение основных размеров сечения по длине. Разработан ряд схем и способов формовки, направленных на предупреждение и устранение этих дефектов [1–11].

Актуальность работы. Наиболее широкое применение нашли способы, предусматривающие уравнивание изгибающих моментов, необходимых для подгибки полок. Однако они обеспечивают положительные результаты только при непрерывном процессе профилирования. При поштучном процессе, который в начале и конце формовки каждой заготовки протекает неустойчиво, их применение не гарантирует отсутствие указанных

дефектов. Кроме того, наблюдается поперечное смещение профилей в калибрах валков, на входе в них и в вертикальных роликах между клетями. В сортаменте профилегибочных агрегатов с поштучным процессом профилирования более 15% составляют несимметричные профили. С учетом изложенного, исследования, направленные на совершенствование технологического процесса поштучного профилирования, являются важными и актуальными.

Цель и задачи исследования. Работа направлена на исследование поштучного процесса формообразования несимметричных профилей и разработку рекомендаций по совершенствованию этого процесса.

© Ю. А. Плеснецов, 2019

Методика исследований. Анализ процесса поштучной формовки несимметричных профилей показал, что, смещение заготовки при задаче в калибр обуславливается неодновременностью начала контакта подгибаемых полок с валками и, соответственно, приложением усилий со стороны валков вначале к одной, а затем к другой полке.

Для обеспечения устойчивого процесса формовки, предупреждения продольного изгиба и скручивания профилей и их поперечного смещения в калибре необходимо одновременное начало контакта с валками, по крайней мере, двух участков переднего конца профиля, размещенных по разные стороны от центра тяжести его поперечного сечения. Такой контакт с горизонтальными валками рабочих клеток целесообразно обеспечивать на кромках. Контакт с неприводными направляющими вертикальными роликами между рабочими клетями следует обеспечивать преимущественно на крайних участках стенки профиля. Одновременное начало контакта на

кромках возможно только при одинаковом удалении точек их соприкосновения с валками от осевой плоскости последних.

Результаты исследований. Точка A соприкосновения кромки с конусной поверхностью валка отстоит от осевой плоскости валков на расстояние (рис. 1, a):

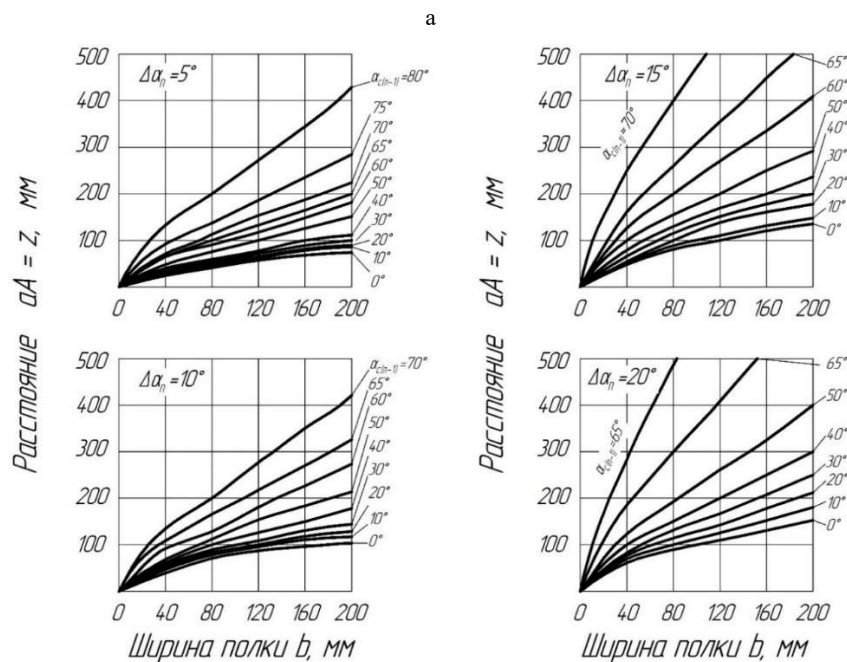
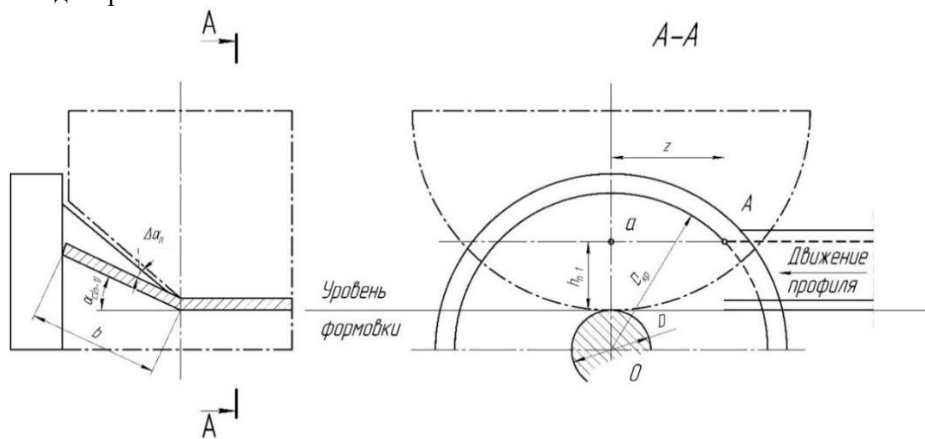
$$z = \left\{ (0,5D_{кр})^2 - [0,5D_{он} + b \sin \alpha_{c(n-1)}]^2 \right\}^{\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

где $D_{кр}$ – диаметр окружности конусного участка нижнего горизонтального валка, проходящей через точку A ;

$D_{он}$ – основной диаметр нижнего валка;

b – ширина подгибаемого элемента;

$\alpha_{c(n-1)}$ – суммарный угол подгибки элемента в предшествующем проходе.



б

Рис. 1 – Определение начала контакта на кромках: а – расчетная схема; б – номограмма для определения расстояния z в зависимости от ширины полки и углов подгибки

В свою очередь,

$$D_{кр} = D_{он} + 2b \cos \alpha_{c(n-1)} \operatorname{tg} \alpha_{cn}, \quad (2)$$

где α_{cn} – суммарный угол подгибки в рассматриваемом калибре:

$$\alpha_{cn} = \alpha_{c(n-1)} + \Delta \alpha_n,$$

где Δ_n – угол подгибки за проход в рассматриваемом калибре).

Далее в целях упрощения записи расчетов будем оперировать высотой профиля после выхода из предыдущей клетки

$$h_{n-1} = b \sin \alpha_{c(n-1)}. \quad (3)$$

После внесения (2) (3) в (1) и несложных преобразований получим

$$z = \left\{ \left[D_{он} + b \cos \alpha_{c(n-1)} \operatorname{tg} \alpha_{cn} + h_{n-1} \right] \times \left[b \cos \alpha_{cn} - h_{n-1} \right] \right\}^{\frac{1}{2}}. \quad (4)$$

С учетом (3)

$$b \cos \alpha_{c(n-1)} = \frac{b \sin \alpha_{c(n-1)}}{\operatorname{tg} \alpha_{c(n-1)}} = \frac{h_{n-1}}{\operatorname{tg} \alpha_{c(n-1)}}.$$

Тогда

$$z = \left\{ \left[D_{он} + h_{n-1} \left[\frac{\operatorname{tg} \alpha_{cn}}{\operatorname{tg} \alpha_{c(n-1)}} + 1 \right] \right] \times h_{n-1} \left[\frac{\operatorname{tg} \alpha_{cn}}{\operatorname{tg} \alpha_{c(n-1)}} - 1 \right] \right\}^{\frac{1}{2}}. \quad (5)$$

Из (3) и (5) следует, что с увеличением ширины подгибаемого элемента, углов подгибки и

основного диаметра нижнего вала расстояние z возрастает.

Расчеты, выполненные на ПК применительно к стану 2÷8x100÷600 ($D_{он}=280$ мм), показали, что для профилей с $b > 20$ мм при Δa от 5° до 20° расстояние z возрастает практически пропорционально увеличению b .

Например, при $b=20$ мм, 100 мм и 180 мм, $\alpha_{c(n-1)}=30^\circ$ и $\Delta a=20^\circ$ расстояние z составляло 56 мм, 150 мм и 230 мм, соответственно.

Номограммы (рис. 1, б), построенные на основании расчета по зависимости (5), позволяют определять положение точек начала контакта профиля с валами и с его учетом разрабатывать и применять способы, направленные на устранение продольного скручивания и искривления профилей.

При производстве профилей сравнительно небольшой ширины наиболее широкое распространение получил простой способ формовки, по которому кромки профиля на протяжении всего процесса профилирования поднимаются на одну и ту же высоту, благодаря чему предупреждается скручивание подгибаемых элементов, особенно на входе в валки.

Для предотвращения смещения профиля во время задачи в калибр разработана специальная конструкция вала с дополнительными переходными конусными участками (рис. 2).

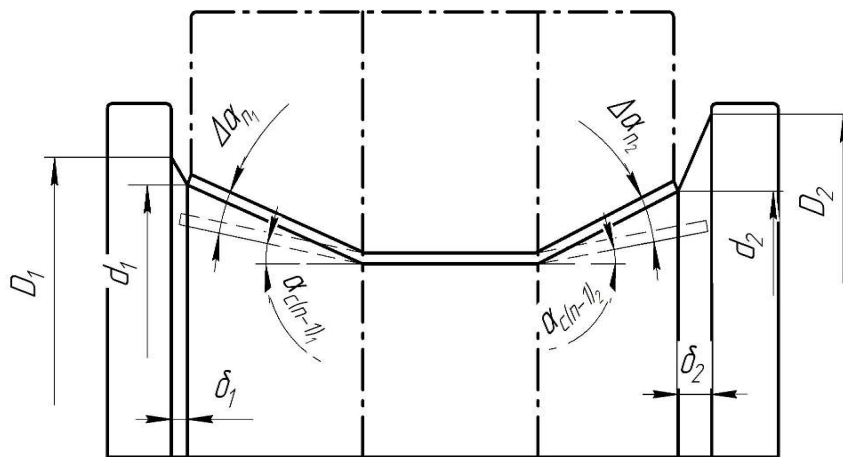


Рис. 2 – Схема вала с дополнительными переходными конусными участками

Ширина b каждого такого участка принимается равной разности проекций полки до и после подгибки на ось вращения вала, а меньший диаметр d участка равен диаметру конусного формирующего элемента вала на уровне кромки в осевой плоскости валков, то есть

$$\delta = b [\cos \alpha_{c(n-1)} - \cos \alpha_{cn}]; \quad (6)$$

$$\frac{D-d}{2\delta} > \operatorname{tg} \alpha_{cn}. \quad (7)$$

На основании результатов расчета по зависимости (6) построена номограмма для определения размера b (рис. 3).

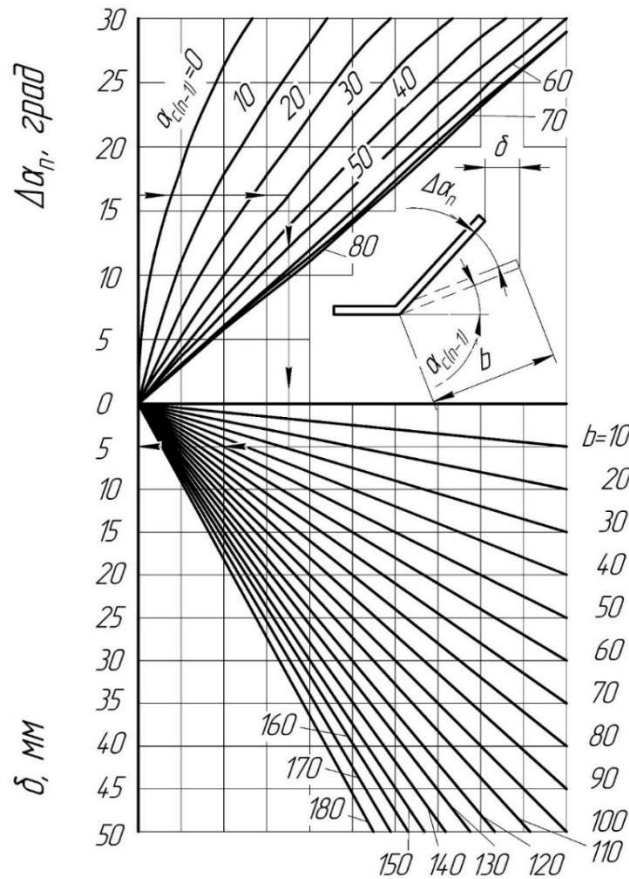


Рис. 3 – Номограмма для определения ширины δ дополнительного конусного участка

Калибр целесообразно ограничивать по ширине вала буртами, выдерживая расстояние между внутренними торцевыми поверхностями равной ширине промежуточного профиля на входе в клеть. Этим обеспечивается продольное направление движущегося профиля и исключается его поперечное смещение в валках.

Режим подгибки большей и меньшей полки следует назначать из условия предотвращения скручивания профиля при стационарном (непрерывном) процессе профилирования. В универсальной рабочей клетке с вертикальными конусными валками (рис. 4) одновременное соприкосновение с ними кромок большей b_6 и меньшей b_m полок профиля на одинаковом расстоянии от осевой плоскости валков ($z_6=z_m$) возможно при выполнении этих валков с неравными основными (максимальными) диаметрами. Согласно рис. 4,

диаметр вертикального вала в месте его соприкосновения с кромкой промежуточного профиля

$$D_{кр}^{(верт)} = D^{(верт)} - 2 \frac{h_{n-1}}{\operatorname{tg} c_n}, \quad (8)$$

где $D^{(верт)}$ – основной (максимальный) диаметр вертикального вала.

Расстояние от проекции точки начала контакта на осевую плоскость валков до оси вертикального вала

$$c = 0,5 D^{(верт)} - \frac{h_{n-1}}{\operatorname{tg} c_{(n-1)}}. \quad (9)$$

Из треугольника AOa (рис. 4)

$$z = \left\{ \left[0,5 D_{кр}^{(верт)} \right]^2 - c^2 \right\}^{\frac{1}{2}}. \quad (10)$$

После подстановки (8) и (9) в (10) получим

$$z = \left\{ \left[D^{(верт)} - h_{n-1} \times \frac{\operatorname{tg} \alpha_{c(n-1)} + \operatorname{tg} c_n}{\operatorname{tg} c_{(n-1)} \operatorname{tg} \alpha_{c_n}} \right] h_{n-1} \times \left[\frac{\operatorname{tg} \alpha_{c_n} - \operatorname{tg} \alpha_{c(n-1)}}{\operatorname{tg} \alpha_{c(n-1)} \operatorname{tg} c_n} \right] \right\}^{\frac{1}{2}}. \quad (11)$$

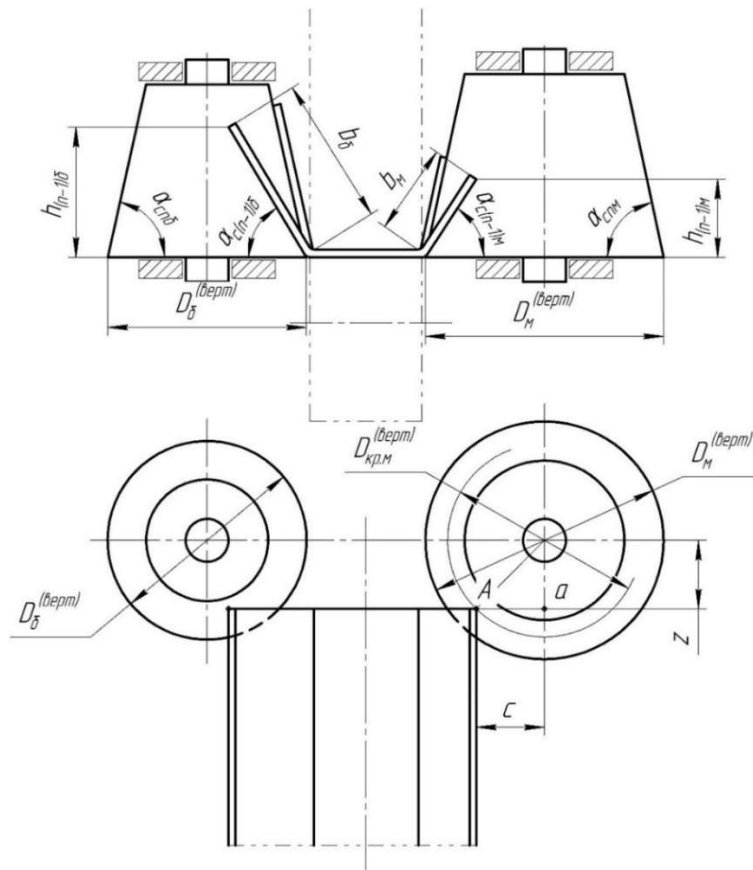


Рис. 4 – Расчетная схема для определения диаметров вертикальных валков универсальной рабочей клетки

Основной диаметр вертикального валка для подгибки большей полки $D_б^{(верт)}$ принимается оптимальным с точки зрения прочности валка и конструктивных особенностей рабочей клетки.

Из условия одновременного соприкосновения кромок большей и меньшей полок профиля с валками,

то есть равенства расстояний от точек соприкосновения кромок с валками до осевой плоскости валков ($z_б=z_м$) определяется основной диаметр вертикального валка для подгибки меньшей полки. В соответствии с (11)

$$D^{(верт)} = h_{(n-1)м} \frac{\operatorname{tg} \alpha_{c(n-1)м} + \operatorname{tg} \alpha_{снм}}{\operatorname{tg} \alpha_{c(n-1)м} \operatorname{tg} \alpha_{снм}} + \frac{h_{(n-1)б}}{h_{(n-1)м}} \times \frac{\operatorname{tg} \alpha_{снб} - \operatorname{tg} \alpha_{c(n-1)б}}{\operatorname{tg} \alpha_{снм} - \operatorname{tg} \alpha_{c(n-1)м}} \times \frac{\operatorname{tg} \alpha_{c(n-1)м} \operatorname{tg} \alpha_{снм}}{\operatorname{tg} \alpha_{c(n-1)б} \operatorname{tg} \alpha_{снб}} \left[D_б^{(верт)} - h_{(n-1)б} \frac{\operatorname{tg} \alpha_{c(n-1)б} - \operatorname{tg} \alpha_{снб}}{\operatorname{tg} \alpha_{c(n-1)б} \operatorname{tg} \alpha_{снб}} \right]. \quad (12)$$

где $h_{(n-1)б}$, $h_{(n-1)м}$ – высота профиля со стороны меньшей и большей полки после предыдущей клетки, соответственно;

$\alpha_{c(n-1)м}$, $\alpha_{c(n-1)б}$ – углы наклона полок после предыдущей клетки;

$\alpha_{снм}$, $\alpha_{снб}$ – углы наклона образующей валков со стороны меньшей и болей полок в данной клетки.

Для качественной отформован мест изгиба профилей относительно большей ширины и сложной формы целесообразно выполнять углы наклона образующей валков одинаковыми, то есть обеспечивать одинаковый наклон большей и меньшей полок относительно стенки профиля.

Для сохранения устойчивости профиля при его прохождении через вертикальные ролики и последующем направлении в валки рабочей клетки

необходимо обеспечивать одновременность начала контакта крайних участков стенки с роликами.

Расстояния от точек начала контакта стенки профиля с роликами со стороны большей и меньшей полок до их осевой плоскости определяются по формулам (рис. 5, а):

$$z_б = \left[(0,5D_б)^2 - (0,5D_{кр} + a_б)^2 \right]^{\frac{1}{2}}; \quad (13)$$

$$z_м = 2 \left[(0,5D_м)^2 - (0,5D_{кр} + a_м)^2 \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (14)$$

где $D_б$ и $D_м$ – максимальные диаметры роликов со стороны большей и меньшей полок профиля;

$D_{кр}$ – минимальные диаметры роликов на уровне кромок;

$a_б$, $a_м$ – проекции большей и меньшей полок на плоскость стенки профиля.

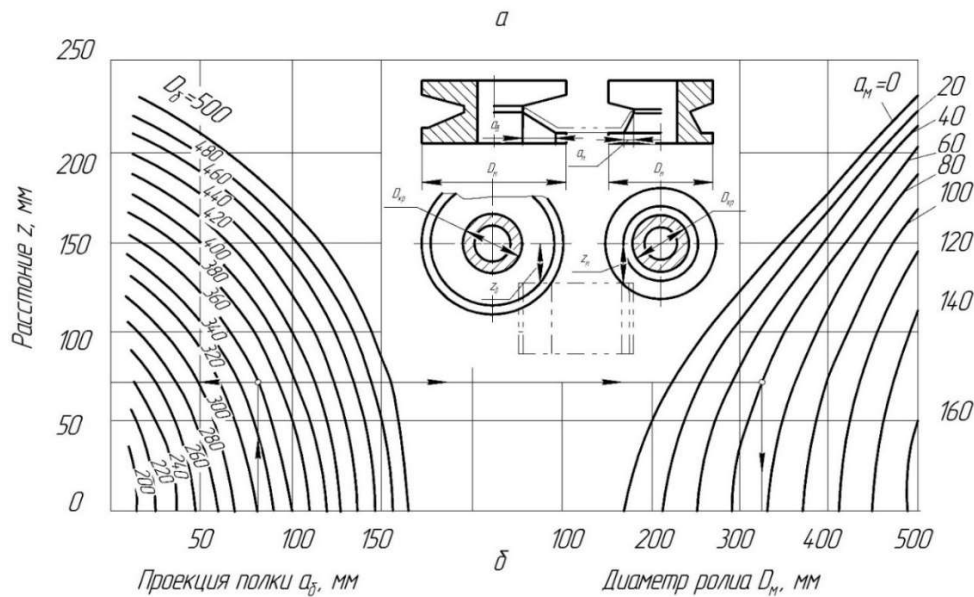


Рис. 5 – Определение диаметров вертикальных роликов и расстояния z от их осевой плоскости до точки начала контакта с профилем: а – расчетная схема; б – номограмма

При $z_6 = z_m$ максимальный диаметр вертикального ролика определяется по формуле

$$D = 2 \left[(0,5D_{кр} + a)^2 + z^2 \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (15)$$

На основании расчета по установленным зависимостям построена номограмма (рис. 5, б) для определения расстояния z и максимальных диаметров вертикальных роликов в зависимости от ширины подгибаемых элементов при минимальном диаметре вала $D_{кр}=170$ мм. Первоначально конструктивно

определяют размеры вертикального ролика со стороны большей полки, а затем по номограмме определяют диаметр меньшего ролика. Полученные зависимости и номограммы, а также показанные выше конструкции валков могут быть использованы при разработке технологии и калибровок валков для производства несимметричных гнутых профилей.

С учетом изложенного, разработаны технология и калибровка для производства специального несимметричного профиля $185 \times 90 \times 50 \times 100 \times 56 \times 6$ мм (рис. 6) из стали Ст. 3кп на стане $2 \times 8 \times 100 \div 600$.

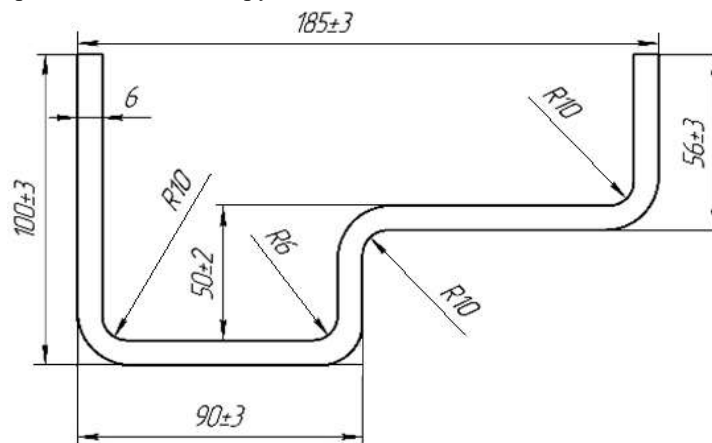


Рис. 6 – Несимметричный профиль $185 \times 90 \times 50 \times 100 \times 56 \times 6$ мм

Выводы. 1. Для обеспечения точного захода полосы в валки, предотвращения ее поперечного смещения и переформовки мест изгиба профиля широко применялись закрытые калибры, в частности с дополнительными переходными конусными участками.

2. Для сведения к минимуму перепада скоростей в калибре и энергетических затрат на формовку профиля углы подгибки элементов участка ступенчатой стенки были выбраны из условия

расположения остальных элементов профиля на уровне основных диаметров валков. В калибрах промежуточных технологических переходов на отдельных участках (полках) применяли углы освобождения до 1° .

3. В связи с тем, что процесс профилирования поштучный, для точного захода заготовки в калибр валков и предупреждения ее продольного изгиба между всеми клетями устанавливали неприводные вертикальные ролики. Диаметры роликов

определены из условия одновременного соприкосновения с ними крайних участков стенки профиля по номограмме, приведенной на рис. 5, б.

4. По разработанной технологии организовано промышленное производство профилей. Описанные выше приемы и способы обеспечивают получение профилей требуемого качества.

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. Марьин 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. Марьин, В.А. Хмель. – Киев: Техника, 1985. – 128 с.
6. Рашников В.Ф. Производство гнутых профилей на Магнитогорском меткомбинате / В.Ф. Рашников, М.Ф. Сафронов, В.Л. Корнилов и др. – Магнитогорск: МГТУ, 1999. – 157 с.
7. Сафронов М.Ф. Производство и эксплуатация валков на металлургическом предприятии / М.Ф. Сафронов, В.Г. Антипанов, В.Л. Корнилов и др. – Магнитогорск: МГТУ, 1999. – 92 с.
8. Roll forming handbook / Edited by George T. Halmos. – Boca Raton, London, New York: Taylor & Francis Group, 2006. – 573 p.
9. Филимонов С.В. Интенсивное формообразование гнутых профилей / С.В. Филимонов, В.И. Филимонов. – Ульяновск: УлГТУ, 2008. – 444 с.
10. Филимонов С.В. Метод, расчеты и технология интенсивного деформирования в роликах гнутых профилей типовой

номенклатуры / С.В. Филимонов, В.И. Филимонов. – Ульяновск: УлГТУ «Венец», 2004. – 246 с.

11. Марковцев В.А. Формообразование стесненным изгибом в роликах и правка гнутых тонкостенных профилей / В.А. Марковцев, В.И. Филимонов. – Ульяновск: УлГТУ, 2006. – 244 с.

References (transliterated)

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

Поступила (received) 18.10.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

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

УДК 621.923

В. И. ПОЛЯНСКИЙ**ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ УСЛОВИЙ ВЫСОКОТОЧНОЙ И ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН**

Приведены аналитические зависимости для определения величины упругого перемещения, возникающего в технологической системе, и основного времени обработки при шлифовании и лезвийной обработке. Показана эффективность уменьшения основного времени обработки при заданной величине упругого перемещения путем существенного увеличения скорости детали, количества проходов шлифовального круга и уменьшения уточнения на проходе круга фактически до единичного значения при шлифовании по схеме выхаживания. Показана также целесообразность осуществления выхаживания в несколько проходов круга с уточнением, равным числу $e \approx 2,72$. Доказано, что в этом случае основное время обработки больше минимально возможного значения в 2,72 раза. Для уменьшения основного времени обработки на эту величину предложено накладывать на шлифовальный круг ультразвуковые колебания в направлении подачи. Предложено также существенно увеличивать скорость детали при круглом врезном шлифовании, уменьшая уточнение на проходе круга фактически до единичного значения. Показано, что при лезвийной обработке одновременно уменьшить величину упругого перемещения и основное время обработки можно, главным образом, путем увеличения скорости резания.

Ключевые слова: шлифование, схема выхаживания, лезвийная обработка, упругое перемещение, основное время обработки, уточнение, высокоскоростное резание, качество обработки.

В. І. ПОЛЯНСЬКИЙ**ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ УМОВ ВИСОКОТОЧНОЇ ТА ВИСОКОПРОДУКТИВНОЇ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН**

Наведено аналітичні залежності для визначення величини пружного переміщення, що виникає в технологічній системі, та основного часу обробки при шліфуванні та лезовій обробці. Показано ефективність зменшення основного часу обробки при заданій величині пружного переміщення шляхом суттєвого збільшення швидкості деталі, кількості проходів шліфувального круга і зменшення уточнення на проході круга фактично до одиничного значення при шліфуванні за схемою виходжування. Показано також доцільність здійснення виходжування в декілька проходів круга з уточненням, що дорівнює величині $e \approx 2,72$. Доведено, що в цьому випадку основний час обробки більше мінімально можливого значення в 2,72 рази. Для зменшення основного часу обробки на цю величину запропоновано накладати на шліфувальний круг ультразвукові коливання в напрямку подачі. Запропоновано також суттєво збільшувати швидкість деталі при круглому врізному шліфуванні, зменшуючи уточнення на проході круга фактично до одиничного значення. Показано, що при лезовій обробці одночасно зменшити величину пружного переміщення і основний час обробки можна, головним чином, шляхом збільшення швидкості різання.

Ключові слова: шліфування, схема виходжування, лезова обробка, пружне переміщення, основний час обробки, уточнення, високошвидкісне різання, якість обробки.

V. I. POLYANSKIY**THEORETICAL SUBSTANTIATION OF THE CONDITIONS OF HIGH-PRECISION AND HIGH-PERFORMANCE MACHINING OF MACHINE PARTS**

Analytical dependences are given to determine the amount of elastic displacement that occurs in the technological system and the main processing time during grinding and blade processing. The effectiveness of reducing the main processing time for a given value of elastic displacement by significantly increasing the speed of the part, the number of passes of the grinding wheel and reducing the refinement on the passage of the wheel to virtually a single value when grinding according to the nursing scheme is shown. The expediency of nursing in several passes of the circle with a refinement equal to the number $e \approx 2.72$ is also shown. It is proved that in this case the main processing time is 2.72 times longer than the minimum possible value. To reduce the main processing time by this value, it is proposed to impose ultrasonic vibrations on the grinding wheel in the feed direction. It is also proposed to significantly increase the speed of a part during round flush grinding, reducing the refinement in the passage of the circle to actually a single value. It is shown that during blade cutting, the elastic displacement and the main processing time can be simultaneously reduced mainly by increasing the cutting speed.

Key words: grinding, nursing pattern, blade processing, elastic movement, main processing time, refinement, high-speed cutting, machining quality.

Введение. Современное машиностроение требует изготовления высокоточных деталей машин на основе применения эффективных технологий финишной механической обработки. В успешном решении этой задачи важная роль принадлежит методам шлифования, обеспечивающим высокие показатели точности и качества обрабатываемых поверхностей, однако характеризующихся относительно низкой производительностью обработки. В связи с этим все чаще в производственных условиях на финишных операциях вместо шлифования используются методы лезвийной обработки (точение, растачивание, фрезерование и т.д.) современными металлорежущими

инструментами. Благодаря высокой режущей способности этих инструментов, изготовленных из синтетических сверхтвердых материалов (СТМ), твердых сплавов и керамических материалов с износостойкими покрытиями, обеспечиваются более высокие показатели производительности обработки, чем при шлифовании. Поэтому чрезвычайно актуальна задача разработки эффективных высокопроизводительных процессов шлифования, позволяющих одновременно повысить точность и особенно производительность обработки до уровня финишной лезвийной обработки и выше. Это требует проведения дальнейших теоретических исследований процесса шлифования и установления оптимальных

условий обработки по критерию наибольшей производительности с учетом ограничения по точности обработки.

Анализ последних исследований и публикаций. Вопросам повышения точности и производительности обработки при шлифовании в научно-технической литературе уделено достаточно большое внимание. В работах [1-3] приведены теоретические решения, позволяющие определить основные условия повышения точности и производительности обработки. В работе [4] приведены аналитические зависимости для определения минимально возможного основного времени обработки при многопроходном шлифовании по схеме выхаживания с учетом ограничения по величине упругого перемещения, возникающего в технологической системе. Показано, что эффективно съём припуска осуществлять за определенное количество проходов круга, при котором основное время обработки принимает наименьшее значение. Однако в приведенных теоретических решениях в одних случаях учитывается, а в других – не учитывается изменение фактической глубины шлифования в связи с возникновением упругих перемещений. Это приводит к различным аналитическим решениям и сделанным на их основе выводам. Поэтому важно с единых позиций оценить роль величины упругого перемещения в формировании погрешности обработки и на этой основе обосновать условия повышения точности и производительности при шлифовании и лезвийной обработке. Это требует дальнейшего развития теоретического подхода к определению параметров точности и производительности обработки, предложенного в работе [4].

Цель работы – теоретическое обоснование условий повышения точности и производительности обработки при шлифовании и лезвийной обработке и разработка практических рекомендаций.

Изложение основного материала. В работе [5] показано, что при многопроходном шлифовании по жесткой схеме величина упругого перемещения y , возникающего в технологической системе, с увеличением количества проходов круга n непрерывно увеличивается, асимптотически приближаясь к установившемуся значению $y_{уст}$ (рис. 1,а). При шлифовании по схеме выхаживания, наоборот, величина упругого перемещения y непрерывно уменьшается, начиная с глубины шлифования t и приближаясь к нулевому значению (рис. 1,б). Следовательно, для достижения требований по точности обработки необходимо использовать схему выхаживания.

С целью исключения переходного процесса, связанного с достижением установившегося значения упругого перемещения (рис. 1, а), в технологической системе создается необходимый натяг. Далее обработка осуществляется в установившемся режиме.

На заключительном этапе шлифования используется схема выхаживания.

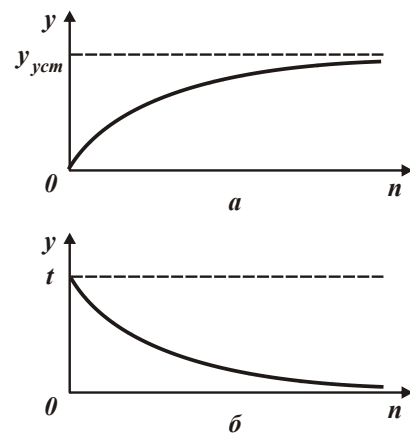


Рис. 1 – Характер изменения величины упругого перемещения y от количества проходов круга n : а – при шлифовании по жесткой схеме и б – выхаживании

В работе [5] предложено съём всего припуска производить по схеме выхаживания, создавая в технологической системе начальный натяг, равный снимаемому припуску. Это обеспечивает максимально возможную производительность при заданной точности обработки. В связи с этим важно теоретически обосновать условия повышения точности и производительности обработки при выхаживании. Для решения поставленной задачи следует воспользоваться результатами исследований, приведенных в работе [5], применительно к процессу плоского многопроходного шлифования по схеме выхаживания. В данном случае радиальная составляющая силы резания P_y равна упруговосстанавливающей силе $c \cdot y$, где c – приведенная жесткость технологической системы, Н/м. Тогда

$$y = \frac{P_y}{c} = \frac{P_z}{c \cdot K_{ш}} = \frac{\sigma \cdot Q}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}} = \frac{\sigma \cdot B_1 \cdot V_{дем} \cdot (t - y)}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}}, \quad (1)$$

где $P_y = P_z / K_{ш}$; $P_z = \sigma \cdot Q / V_{кр}$ – тангенциальная составляющая силы резания, Н; $K_{ш}$ – коэффициент шлифования; σ – условное напряжение резания, Н/м²; $Q = B_1 \cdot V_{дем} \cdot (t - y)$ – фактическая производительность обработки, м³/с; B_1 – ширина шлифования, м; $V_{дем}$ – скорость детали, м/с; t – номинальная глубина шлифования, м; $V_{кр}$ – скорость круга, м/с.

Разрешая зависимость (1) относительно величины упругого перемещения y , получено:

$$y = \frac{t}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}}{\sigma \cdot B_1 \cdot V_{дем}}\right)} = \frac{t}{\varepsilon}, \quad (2)$$

где $\varepsilon = 1 + \frac{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}}{\sigma \cdot B_1 \cdot V_{дем}}$ – уточнение на проходе шлифовального круга.

Как видно, с каждым последующим проходом круга n величина ε остается неизменной, а фактическая глубина шлифования $t/\varepsilon \dots t/\varepsilon^{n-1}$ уменьшается. Величина упругого перемещения y_n (на n -ом проходе круга) принимает вид:

$$y_n = \frac{t}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}}{\sigma \cdot B_1 \cdot V_{дем}}\right)^n} = \frac{t}{\varepsilon^n}. \quad (3)$$

Следовательно, с увеличением n величина упругого перемещения y_n уменьшается. Это свидетельствует об эффективности применения схемы выхаживания на заключительном этапе шлифования для обеспечения заданной точности обработки, определяемой величиной y_n .

Очевидно, с увеличением n основное время обработки τ будет увеличиваться. Поэтому важно определить условия шлифования, при которых τ принимает наименьшее значение. Для этого следует выразить τ через суммарное уточнение $\varepsilon_{сум}$, которое, как известно, определяется зависимостью [5]: $\varepsilon_{сум} = t/y_n = \varepsilon^n$. Следовательно, при заданном значении $\varepsilon_{сум}$ с увеличением n уточнение на проходе круга ε будет уменьшаться $\varepsilon \rightarrow 1$.

В общем виде основное время обработки τ описывается зависимостью:

$$\tau = \frac{n \cdot L}{V_{дем}}, \quad (4)$$

где L – длина хода стола станка, м.

Выражая скорость детали $V_{дем}$ через уточнение на проходе круга ε и подставляя полученное выражение в зависимость (4), имеем:

$$\tau = \frac{n \cdot L \cdot \sigma \cdot B_1}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}} \cdot (\varepsilon - 1) = \frac{n \cdot L \cdot \sigma \cdot B_1}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}} \cdot \left(\varepsilon_{сум}^{\frac{1}{n}} - 1\right). \quad (5)$$

Как видно, увеличение количества проходов круга n неоднозначно влияет на основное время обработки τ . Поэтому следует провести анализ первой производной функции τ (определяющей тангенс угла наклона функции τ) от n :

$$\tau'_n = \frac{L \cdot \sigma \cdot B_1}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}} \cdot \varepsilon_{сум}^{\frac{1}{n}} \cdot \left(1 - \frac{\ln \varepsilon_{сум}}{n}\right) - 1. \quad (6)$$

Очевидно, первая производная функции τ'_n – отрицательная величина, стремящаяся к нулю при $n \rightarrow \infty$. Следовательно, основное время обработки τ с увеличением количества проходов круга n уменьшается, асимптотически приближаясь к

постоянному значению, определяемому по правилу Лопиталья при неопределенности $\left(\frac{0}{0}\right)$:

$$\tau_n = \frac{L \cdot \sigma \cdot B_1}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}} \cdot \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\left(\varepsilon_{сум}^{\frac{1}{n}} - 1\right)'}{\left(\frac{1}{n}\right)'}, \quad (7)$$

Отношение значений основного времени обработки τ при $n=1$ и $n \rightarrow \infty$ определяется:

$$\frac{\tau}{\tau_n} = \frac{(\varepsilon_{сум} - 1)}{\ln \varepsilon_{сум}}. \quad (8)$$

С увеличением суммарного уточнения $\varepsilon_{сум}$ отношение τ/τ_n увеличивается (табл. 1). Следовательно, усиливается эффект уменьшения основного времени обработки τ с увеличением n .

Таблица 1. Расчетные значения отношения τ/τ_n

$\varepsilon_{сум}$	20	55	149	405	1102
τ/τ_n	6,3	13,7	29,6	67,3	157,3

Если в зависимости (1) не учитывать уменьшение фактической глубины шлифования в связи с возникновением в технологической системе упругого перемещения y , то зависимость (1) примет вид:

$$y = \frac{\sigma \cdot B_1 \cdot V_{дем} \cdot t}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}} = \frac{t}{\left(\frac{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}}{\sigma \cdot B_1 \cdot V_{дем}}\right)} = \frac{t}{\varepsilon}, \quad (9)$$

где $\varepsilon = \frac{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}}{\sigma \cdot B_1 \cdot V_{дем}}$.

В данном случае уточнение на проходе круга ε принимает меньшее значение, чем в зависимости (1). В связи с этим важно установить, как это отразится на характере изменения основного времени обработки τ , определяемом следующей зависимостью:

$$\tau = \frac{n \cdot L \cdot \sigma \cdot B_1}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}} \cdot \varepsilon_{сум}^{\frac{1}{n}}. \quad (10)$$

Исходя из зависимости (10), имеет место экстремум (минимум) основного времени обработки τ от n . Подчиняя зависимость (10) необходимому условию экстремума $\tau'_n = 0$, получено:

$$n = \ln \varepsilon_{сум}; \quad (11)$$

$$\tau_{min} = e \cdot \ln \varepsilon_{сум}, \quad (12)$$

где $e \approx 2,72$.

Таким образом установлено, что в точке экстремума функции τ уточнение на проходе круга $\varepsilon = e$, т. е. справедлива зависимость $\varepsilon_{сум} = t/y_n = e^n$.

Следовательно, экстремальное (минимальное) значение основного времени обработки τ в 2,72 раза больше минимально возможного значения τ_n , полученного для случая $n \rightarrow \infty$ (соответственно $\varepsilon \rightarrow 1$) и определяемого зависимостью (7).

В табл. 2 и на рис. 2 показан характер изменения основного времени обработки τ , установленного на основе зависимостей (5) и (10) с учетом $\frac{L \cdot \sigma \cdot B_1}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}} = 1$ с, и уточнения $\varepsilon = \sqrt[n]{\varepsilon_{сум}}$ от n . При обработке с $n=1 \dots 4$ имеет место значительное уменьшение параметров τ и ε , т.е. эффективно сьем припуска производить за несколько проходов круга.

Таблица 2. Расчетные значения τ и ε для $\varepsilon_{сум} = 100$

n	1	2	3	4	5	20
τ , с, зависимость (5)	99	18	10,8	8,6	7,5	5,4
τ , с, зависимость (10)	100	20	13,8	12,6	10,5	25,4
ε	100	10	4,6	3,15	2,5	1,27

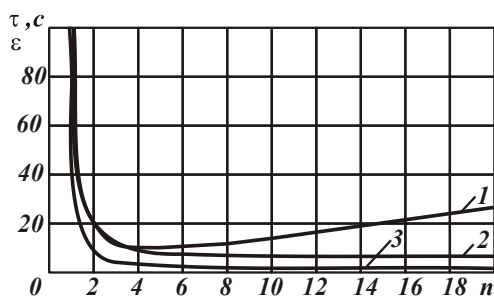


Рис. 2 – Зависимости τ и ε от n : 1, 2 – значения τ , рассчитанные по зависимостям (10) и (5); 3 – $\varepsilon = \sqrt[n]{\varepsilon_{сум}}$

Для сравнения с расчетными данными, приведенными в табл. 1, в табл. 3 приведены расчетные значения отношения τ / τ_{min} и соответствующие им значения n в зависимости от суммарного уточнения $\varepsilon_{сум}$.

Таблица 3. Расчетные значения отношения τ / τ_{min} и n

$\varepsilon_{сум}$	20	55	149	405	1102
τ / τ_{min}	2,32	5,0	10,9	24,7	57,8
n	3	4	5	6	7

Как видно, отношение τ / τ_{min} в 2,72 раза меньше отношения τ / τ_n . Из этого вытекает, что зависимости (11) и (12) удобны для расчетов, поскольку на практике механическая обработка детали, как правило, осуществляется за несколько проходов круга n . Дальнейшее увеличение $n \rightarrow \infty$ при соответствующем уменьшении $\varepsilon \rightarrow 1$ и увеличении скорости детали $V_{дем} \rightarrow \infty$ позволяет приблизить основное время обработки τ к минимально возможному значению τ_n .

Однако осуществить это условие практически невозможно. Для этого требуется создание новых прогрессивных методов шлифования. Одним из них может быть метод шлифования с наложением на шлифовальный круг ультразвуковых колебаний в направлении перемещения круга. С физической точки зрения применение ультразвуковых колебаний приводит к тому, что шлифовальный круг условно как бы осуществляет обработку с чрезвычайно большими значениями скорости детали $V_{дем} \rightarrow \infty$ и $n \rightarrow \infty$. В итоге реализуется условие $\tau \rightarrow \tau_n$, а, следовательно, решается задача повышения точности и производительности обработки.

Необходимо отметить, что на практике, благодаря применению ультразвуковых колебаний шлифовального круга при шлифовании [6], достигнут значительный эффект с точки зрения повышения качества и точности обрабатываемых поверхностей, а также производительности обработки. Объясняется это проявлением различных физических факторов, но только не за счет уменьшением уточнения на проходе шлифовального круга $\varepsilon \rightarrow 1$, как это показано в настоящей работе. Поэтому, используя данное теоретическое решение, появляется возможность с новых теоретических позиций подойти к анализу эффективности практического применения ультразвуковых колебаний при шлифовании.

Еще одним эффективным направлением реализации чрезвычайно больших значений скорости детали $V_{дем} \rightarrow \infty$ и $n \rightarrow \infty$ следует рассматривать врезное круглое наружное (или внутреннее) шлифование по схеме выхаживания. Для этого необходимо рассматривать длину окружности цилиндрической детали условно равной длине обрабатываемой детали при плоском шлифовании. Тогда сьем припуска будет происходить за большое количество вращений детали, что соответствует большому количеству проходов круга при плоском шлифовании. Это обеспечивает выполнение условия $\tau \rightarrow \tau_n$ и, следовательно, достижение высоких показателей точности и производительности обработки, что подтверждается известными экспериментальными данными [6].

Несомненно, с этой точки зрения глубинное шлифование менее эффективно, поскольку сьем припуска осуществляется за один проход круга. Однако при глубинном шлифовании уменьшается вспомогательное время, затрачиваемое на реверсирование стола станка. В результате уменьшается штучное время обработки детали и повышается производительность обработки. Поэтому выбор наиболее рациональной схемы шлифования необходимо производить в каждом конкретном случае обработки с учетом требований по точности обрабатываемой детали и обеспечением максимально возможной производительности обработки.

Если фактическую глубину шлифования рассматривать суммой номинальной глубины шлифования t и величины упругого перемещения y ,

то зависимость (1) преобразуется в зависимость (9). В этом случае за один проход круга можно обеспечить заданную точность обработки без применения схемы выхаживания. Это повышает производительность обработки. Однако при этом возможно превышение фактической глубины шлифования заданной величины, что может привести к снижению точности обработки и браку изготавливаемой детали. Поэтому целесообразно шлифование производить с фактической глубиной шлифования, которая меньше номинальной глубины шлифования на величину упругого перемещения, т.е. в соответствии с зависимостью (3). В этом случае будет гарантированно обеспечиваться требуемая точность обработки, что имеет место на практике.

При финишной лезвийной обработке (например, точении и растачивании) съем припуска осуществляется по жесткой схеме и упругое перемещение увеличивается с каждым последующим проходом инструмента (рис. 1, а) по закону [5]:

$$y_n = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{t}{\varepsilon^n}, \quad (13)$$

где $\varepsilon = 1 + \frac{c \cdot K_{рез}}{\sigma \cdot S}$ – уточнение на проходе инструмента; $K_{рез} = P_z / P_y$; S – подача, м/об.

Поэтому целесообразно обработку производить за один или несколько проходов инструмента. При этом важно увеличивать уточнение $\varepsilon \gg 1$ путем увеличения c , $K_{рез} = P_z / P_y$ и уменьшения σ и S . Однако уменьшение подачи S неэффективно в связи с уменьшением производительности обработки $Q = S \cdot t \cdot V$, где V – скорость резания, м/с. Следовательно, необходимо одновременно с уменьшением подачи S увеличивать скорость резания V , обеспечивая постоянство или даже увеличение производительности обработки. Данное условие использовано при создании эффективных технологий финишной лезвийной обработки, применяемых на практике. Это свидетельствует о достоверности полученных теоретических решений.

Выводы. Приведены аналитические зависимости для определения величины упругого перемещения, возникающего в технологической системе, и основного времени обработки при шлифовании и лезвийной обработке. Показана эффективность уменьшения основного времени обработки при заданной величине упругого перемещения путем существенного увеличения скорости детали, количества проходов шлифовального круга и уменьшения уточнения на проходе круга фактически

до единичного значения при шлифовании по схеме выхаживания. Показана также целесообразность осуществления выхаживания в несколько проходов круга с уточнением, равным числу $e \approx 2,72$. Доказано, что в этом случае основное время обработки больше минимально возможного значения в 2,72 раза. Для уменьшения основного времени обработки на эту величину предложено накладывать на шлифовальный круг ультразвуковые колебания в направлении подачи. Предложено также существенно увеличивать скорость детали при круглом врезном шлифовании, уменьшая уточнение на проходе круга фактически до единичного значения. Показано, что при лезвийной обработке одновременно уменьшить упругое перемещение и основное время обработки можно путем увеличения скорости резания.

Список литературы:

1. Лурье Г. Б. Прогрессивные методы круглого наружного шлифования / Г. Б. Лурье. – Ленинград: Машиностроение, 1984. – 103 с.
2. Колев К. С. Точность обработки и режимы резания / К. С. Колев, Л. М. Горчаков. – Москва: Машиностроение, 1976. – 144 с.
3. Новоселов Ю. К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке / Ю. К. Новоселов. – Саратов, 1979. – 232 с.
4. Ковальчук А. Н. Оптимизация структуры и параметров операций шлифования ответственных валов приводов шахтных конвейеров: автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.02.08 «Технология машиностроения» / А. Н. Ковальчук. – Одесса, 2008. – 21 с.
5. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общей редакцией Ф. В. Новикова и А. В. Якимова. В десяти томах. – Т. 7. «Точность обработки деталей машин». – Одесса: ОНПУ, 2004. – 546 с.
6. Захаренко И. П. Основы алмазной обработки твердосплавного инструмента / И. П. Захаренко. – Киев: Наукова думка, 1981. – 300 с.

References (transliterated)

1. Lur'ye G. B. Progressivnyye metody kruglogo naruzhnogo shlifovaniya [Progressive methods of circular external grinding]. Leningrad, Mashinostroeniye, 1984. – 103 p.
2. Kolev K. S., Gorchakov L. M. Tochnost' obrabotki i rezhimov rezaniya [Precision of processing and cutting conditions]. – Moscow, Mashinostroeniye, 1976. – 144 p.
3. Novoselov YU. K. Dinamika formoobrazovaniya poverkhnostey pri abrazivnoy obrabotke [Dynamics of surface formation during abrasive processing]. – Saratov, 1979. – 232 p.
4. Koval'chuk A. N. Optimizatsiya struktury i parametrov operatsiy shlifovaniya otvetstvennykh valov privodov shakhtnykh konveyerov: avtoreferat dis. na soiskaniye stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk: spetsial'nost' 05.02.08 «Tekhnologiya mashinostroeniya» [Optimization of the structure and parameters of grinding operations of critical shafts of mine conveyor drives: abstract of thesis. for the degree of candidate of technical sciences: specialty 05.02.08 «Technology of mechanical engineering»]. Odessa, 2008. – 21 p.
5. Fiziko-matematicheskaya teoriya protsessov obrabotki materialov i tekhnologii mashinostroeniya [Physicomathematical theory of material processing processes and engineering technology] / Pod obshchey redaktsiyey F. V. Novikova i A. V. Yakimova. V desyati tomakh. – Tom 7. «Tochnost' obrabotki detaley mashin» [Vol. 7. «Precision of machining of machine parts»]. Odessa, ONPU, 2004. – 546 p.
6. Zakharenko I. P. Osnovy almaznoy obrabotki tverdosplavnogo instrumenta [Fundamentals of diamond processing of carbide tools]. Kiyev, Naukova dumka, 1981. – 300 p.

Поступила (received) 01.11.2019

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: tools@imperija.com ; ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5482-9955>

УДК 620.179.16: 620.179.17

САЛАМ БУССИ**ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ МЕХАНІЗМІВ ЕЛЕКТРОМАГНІТНО-АКУСТИЧНОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ ПРИ КОНТРОЛІ ЯКОСТІ ПРОКАТНИХ ВИРОБІВ**

Виконано аналіз інформаційних джерел, в яких наведені результати за останні роки теоретичних і модельних досліджень електромагнітної-акустичного способу збудження і прийому ультразвукових хвиль об'ємного, поверхневого і нормального типів в катаних металовиробах. Показано, що взаємодія вихрових струмів з індукцією поля підмагнічування породжує сили, які приводять до збудження ультразвукових імпульсів. Окрім сили Ампера виникають також магнітострикційні сили, що обумовлені ефектом Джоуля, а також сили, що виникають за рахунок протягування виробу до перетворювача.

Визначено, що прийом акустичних хвиль електромагнітно – акустичним перетворювачем обумовлений вихровими струмами в приповерхневому шарі катаного металовиробу, що коливається з певною швидкістю в магнітному полі, а також за рахунок зворотних магнітострикційних або магнітопружних ефектів (Маттеучі, Віларі) при деформації металу акустичної хвилею.

Встановлено, що комплексними теоретичними і модельними дослідженнями створюються більш ефективні основи конструювання ультразвукових перетворювачів різного призначення. Показана можливість створення електромагнітно – акустичних ультразвукових перетворювачів з фазованими ґратками, а також пристроїв з імпульсними джерелами поляризованого магнітного поля.

Ключові слова: металопрокат, електромагнітно-акустичний перетворювач, властивості матеріалів, неруйнівний контроль, дефекти, вимірювання, діагностика, товщинометрія, моделювання.

САЛАМ БУССИ**ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕХАНИЗМОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНО-АКУСТИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ПРИ КОНТРОЛЕ КАЧЕСТВА ПРОКАТНЫХ ИЗДЕЛИЙ**

Выполнен анализ информационных источников, в которых приведены результаты за последние годы теоретических и модельных исследований электромагнитно-акустического способа возбуждения и приема ультразвуковых волн объемного, поверхностного и нормального типов в катаных металлоизделиях. Показано, что взаимодействие вихревых токов с индукцией поля подмагничивания порождает силы, которые приводят к возбуждению ультразвуковых импульсов. Кроме силы Ампера возникают также магнитострикционные силы, обусловленные эффектом Джоуля, а также силы, возникающие за счет протягивания изделия к преобразователю.

Определено, что прием акустических волн электромагнитно - акустическим преобразователем обусловлен вихревыми токами в приповерхностном слое катаной металлоизделия, которая колеблется с определенной скоростью в магнитном поле, а также за счет обратных магнитострикционных или магнитоупругих эффектов (Маттеучи, Вилари) при деформации поверхности металла акустической волной.

Установлено, что комплексными теоретическими исследованиями создаются более эффективные основы конструирования ультразвуковых преобразователей различного назначения. Показана возможность создания электромагнитно - акустических ультразвуковых преобразователей с фазированной решеткой, а также устройств с импульсными источниками поляризованного магнитного поля.

Ключевые слова: металопрокат, электромагнитно-акустический преобразователь, свойства материалов, неразрушающий контроль, дефекты, измерения, диагностика, толщинометрия, моделирование.

SALAM BUSSEY**FEATURES OF USE OF MECHANISMS OF ELECTROMAGNETIC-ACOUSTIC TRANSFORMATION IN QUALITY CONTROL OF ROLLED ITEMS**

The analysis of information sources is carried out, in which the results of recent years of theoretical and model studies of the electromagnetic-acoustic method of exciting and receiving ultrasonic waves of volume, surface and normal types in rolled metal products are presented. It is shown that the interaction of eddy currents with the induction of the magnetization field generates forces that lead to the excitation of ultrasonic pulses. In addition to the Ampere force, there are also magnetostrictive forces due to the Joule effect, as well as forces arising from pulling the product to the transducer.

It was determined that the reception of acoustic waves by an electromagnetic - acoustic transducer is caused by eddy currents in the surface layer of rolled metal products, which oscillates at a certain speed in a magnetic field, and also due to inverse magnetostrictive or magnetoelastic effects (Matteuchi, Viları) during deformation of a metal surface by an acoustic wave.

It has been established that complex theoretical studies create more effective foundations for the design of ultrasonic transducers for various purposes. The possibility of creating electromagnetic - acoustic ultrasonic transducers with a phased array, as well as devices with pulsed sources of a polarizing magnetic field is shown.

Key words: metal rolling, electromagnetic-acoustic transducer, material properties, non-destructive testing, defects, measurements, diagnostics, thickness measurement, modeling.

Вступ. Багато дослідників з різних країн виконують теоретичні, модельні та практичні дослідження, спрямовані на розробку електромагнітної-акустичних (ЕМА) перетворювачів. У їх числі: В.М. Бобренко, В.Т. Бобров, Б.А. Буденков, Г.А. Буденков, А.І. Бутенко, А.Н. Васильєв, Н.П. Гайдуков, М.А. Глухов, Г.І. Деордієв, І.В. Ільїн, В.О. Жуков, О.М. Карпаш, А.В. Кириков, В.А. Комаров, А.В. Малинка, О.В. Мозговий, В.Ф. Мужичський, В.В. Муравйов, О.В. Муравйова, Ж.Г. Никифоренко, О.В.Неволін, В.П. Олышанський,

О.М. Петрищев, Ю.В. Петров, В.Б. Ремезов, Ю.І. Сазонов, Г.М. Сучков, В.Ф. Тарабрин, В.А. Троїцький, Г.С. Тимчик, В.С. Чабанов, А.В. Харитонов, П.Ф. Шаповалов, G.A. Alers, R.E. Beissner, J.W. Boyes, E. Burstein, J.J. Quinn, D.E. Chimenti, J. DeKlerk, T. Yamasaki, B.W. Maxfield, E.R. Dobbs, C.M. Fortunko, R.B. Thompson, H.M. Frost, H.L. Grubin, J. Herbertz, R.G. Pohlman, K. Kawashina, W. Mohr, T.J. Moran, H. Shimizu, T.L. Szabo, H. Talaat, C.V. Vasile, T. Tsai, S.D. Wu, W.D. Wallace, K.R. Whittington, D.M. Wilson і багато інших. Однак

© Салам Бусси, 2019

рівень складності і різноманіття проблем, що вирішуються при дослідженнях і створенні засобів контролю і діагностики на базі ЕМА перетворювачів (ЕМАП), виявився настільки високим, а перспективи, що відкриваються при цьому, настільки значними, що результати, досягнуті в минулому в цій області, не можуть бути достатніми.

У журналі «Дефектоскопія» у вигляді оглядів до 2005 р [1–3] розглянуті питання, пов'язані з проблемами досліджень, розробки і реалізації засобів електромагнітної-акустичних вимірювань, контролю та діагностики обладнання, виробів і матеріалів. Досить широко досягнення, пов'язані з ЕМА способом, представлені в довіднику [4]. За останні роки виконано багато нових робіт в цьому напрямку. Виникла необхідність в їх аналізі, систематизації та визначенні шляхів подальшого розвитку ЕМА методу і засобів його реалізації.

Метою роботи є аналіз нових літературних джерел і встановлення тенденцій розвитку засобів вимірювань, контролю та діагностики з використанням ЕМА способу збудження і прийому ультразвукових хвиль.

Аналіз виконаних досліджень. Єрмолов І.М. в роботі [5] розглянув «... досягнення в теоретичних питаннях ультразвукової дефектоскопії приблизно за 20 минути років». Їм показано, що останнім часом намітилися тенденції використання нових або типів ультразвукових хвиль, які мало і недостатньому об'ємі використовувалися для діагностики об'єктів різного виду. У зв'язку з цим виникають проблеми теоретичного і практичного характеру. Значна кількість істотних проблем контролю може бути вирішено із застосуванням ЕМА перетворювачів. При цьому Єрмолов І.М. [5] вказує на недостатність розробок спеціального обладнання для реалізації ЕМА методу в промисловості: ЕМАП, генераторів потужних імпульсів, підсилювачів, швидкодіючих систем обробки інформації.

Сазонов Ю.І. [6] вказує на те, що дослідження макро– і мікроскопічних механізмів ЕМА перетворення різного виду є однією з найбільш важливих і, в той же час, складних проблем радіофізики, фізичної та прикладної акустики, фізики твердого тіла, фізики магнітних явищ, теплофізики та молекулярної фізики. Дослідження ЕМА ефектів є нетиповою завданням електродинаміки взаємодіючих тіл і полів різного типу і структури. Вивчення механізмів ЕМА перетворення дає можливість краще зрозуміти фізичні процеси генерації, поширення і прийому ультразвукових хвиль електромагнітними полями, що важливо для побудови загальної теорії і створення різного роду пристроїв і перетворювачів, тобто ставиться завдання побудови загальної теорії ЕМА перетворення; створення наукових основ конструювання ЕМАП і необхідного спеціального обладнання.

За останні 15 років групою дослідників у складі Мужицького В.Ф., Комарова В.А. і Ремезова В.Б., які

вважаються на пострадянському просторі провідними теоретиками, опубліковано понад 50 теоретичних статей в журналах «Дефектоскопія», «Контроль. Діагностика», «В світі неруйнівного контролю», спрямованих на дослідження механізмів прямого, зворотного і подвійного ЕМА перетворення в додатку до товщинометрії і дефектоскопії в нормальному і тангенціальному поляризують полях в основному для накладних ЕМАП. У всіх цих статтях, в порівнянні з аналогічними роботами, виконаними в минулому столітті Буденкова Г.А., Глуховим Н.А., Сазоновим Ю.І., Шкарлета Ю.М., Шубаєвим С.Н. та ін., розглянуті окремі завдання, в яких не знайдені нові принципи наукові рішення по створенню загальної теорії ЕМА перетворення. Відсутні також розробки основних положень, які б дали можливість конструювати ЕМА перетворювачі на базі таких досліджень. Однією з типових робіт по оцінці коефіцієнта ЕМА перетворення є стаття [7]. Автори як і раніше призводять давно відомі дані трьох типів видів взаємодії ЕМАП і металу.

При збудженні ультразвукових хвиль:

1. Взаємодія вихрових струмів i_b довжиною dl з індукцією поля підмагнічування B_0 (сила Ампера F_A)

$$F_A = i_b [D_l B_0].$$

2. Взаємодія вихрових струмів i_b з струмом i_k високочастотного індуктора, що породжує вихровий струм, з силою F :

$$F = \frac{M_0}{4\pi} = \frac{2i_b i_k}{h} dl$$

де h – зазор між індуктором і об'єктом контролю; dl – середня довжина вихрового струму.

3. Прямі магнітострикційні ефекти. Зокрема, сила магнітострикційною природи F при поздовжньої лінійної магнітострикції (ефект Джоуля).

4. У той же час експериментальні дані [8], рис. 1, показують, що при збудженні об'ємних зсувних ультразвукових імпульсів, за інших однакових умов, відбита від плоскодонного відбивача діаметром 4 мм амплітуда сигналу має нелінійну залежність від величини струму в індукторі ЕМАП. Це говорить про необхідність вдосконалення теорії ЕМА перетворення.

Прийом акустичних хвиль ЕМАП обумовлений:

1. Електромагнітними полями, породжуються вихровими струмами в приповерхневому шарі об'єкта, що коливається зі швидкістю v в магнітному полі з індукцією B_0 . При цьому напруженість змінного магнітного поля $E = [vB_m]$, а е.р.с. індукції $\varepsilon_i = [vB_0] dl$.

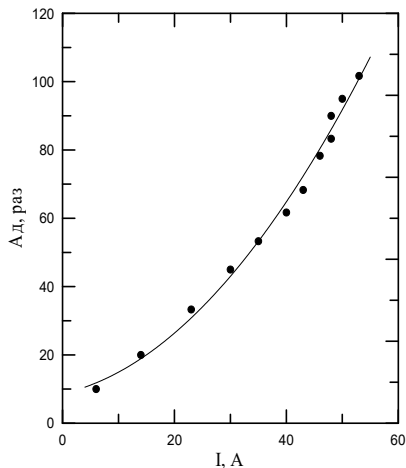


Рис. 1 – Залежність амплітуди ультразвукового імпульсу, відбитого від моделі дефекту діаметром 4 мм від величини струму в котушці індуктивності ЕМАП

2. Електромагнітними полями, що виникають за рахунок зворотних магнітострикційних або магнітопружних ефектів (Маттеучі, Віларі) при деформації металу акустичної хвилею з напругою σ_m . При цьому індукція змінного магнітного поля $B_m = \sigma_m \cdot A$ (A – постійна чутливості), а е.р.с. індукції $\varepsilon_i = -S dB / dt = -S A \omega \sigma_m$, де ω – частота змінного магнітного поля.



Рис. 2 – Додаткові імпульси (1, 2, 3) між двома донними сигналами, відбиті від «дна» виробу

Результати експериментальних досліджень [9–10] чутливого подвійного ЕМА перетворення показали, що одночасно зі зсувними лінійно поляризованими хвилями збуджуються і приймаються нормально до поверхні плоскопаралельного виробу інші типи хвиль, рис. 2, поз. 1, 2 і 3. При використанні лунаметоду контролю такі когерентні сигнали будуть ускладнювати аналіз результатів дефектоскопії. Ефект появи додаткових ультразвукових сигналів до теперішнього часу теоретично не досліджений. У той же час виявлений ефект може знайти широке застосування для одночасного визначення швидкостей об'ємних хвиль, пружних постійних і для безеталонної

товщинометрії одного і того ж обсягу об'єкта контролю (ОК) одним ЕМАП.

Отже, незважаючи на значні обсяги раніше виконаних теоретичних досліджень, до теперішнього часу вирішені далеко не всі необхідні для практичних розробок науково-технічні завдання, які б комплексно враховували всі фактори, що визначають процес ЕМА перетворення. Отже, можна зробити висновок, що практично всі теоретичні дослідження виконані для конкретних типів матеріалів і їх стану; для спрощених моделей високочастотних котушок ЕМАП, наприклад, типу «виток» [11], робота якого була розглянута ще в сімдесятих роках минулого століття Шкарлетом Ю.М. У той же час, як визначили Єрмолов І.М. і Сазонов Ю.І. [5–6] з урахуванням раніше виконаних теоретичних робіт, сучасні завдання ЕМА розробок повинні бути спрямовані на створення засобів контролю і, в першу чергу, ЕМАП і спеціального обладнання, що забезпечує його ефективну роботу.

В останні роки група вчених з Іжевська під керівництвом Муравйової О.В., Муравйова В.В. і Мурашова С.А. опублікувала понад 30 теоретичних і модельних статей, за тематикою, пов'язаною з ЕМА контролем стрижнів, труб та аналогічних виробів. Виконано обмежені дослідження локальних процесів перетворення, діаграм спрямованості синфазних і протифазних ЕМА перетворювачів при різних розмірах і розташуванні елементів високочастотних котушок і намагнічувальних систем. З цих розробок слід відзначити ефективність застосування моделювання магнітних, електромагнітних і акустичних полів ЕМАП за допомогою сучасного програмного пакета COMSOL Multiphysics. Аналогічний підхід ефективно використаний в роботі [12] при формуванні поляризованого магнітного поля перетворювача, що дозволило створити високоєфективний ЕМАП для контролю хвилями Релея. Спільно з аналітичними рішеннями завдань ЕМА перетворення застосування сучасних розрахункових пакетів може істотно поліпшити можливості розробок ЕМА перетворювачів.

Значна частина дослідників направили зусилля на створення засобів ЕМА контролю [13] за рахунок широкого застосування моделювання і теоретичних досліджень. Чабанов В.С. і Жуков В.О. розглянули проблеми, пов'язані з конструюванням ЕМАП [14] і стверджують, що для ефективного розробки ЕМАП необхідно враховувати не менше 35 параметрів. Отримана ними математична модель враховує 38 параметрів. Проте слід зазначити, що докладного аналізу отриманої математичної моделі автори не провели, приділивши основну увагу експериментальним розробкам, що знижує цінність таких досліджень. Не представлена методика аналізу запропонованої складної математичної моделі.

Автори робіт [15–20] на базі теорії Власова К.Б., теореми Шоклі-Рамо і теореми Дж. Маллінсона пішли по шляху комплексного створення математичних моделей, що дозволяють проводити розрахунки будь-яких конструкцій ЕМАП. У роботах визначені основи

збудження поверхневих і крутильних коливань.

На основі теореми про наведений магнітний потік розроблена математична модель, яка дозволяє виконувати розрахунок е.р.с., що наводиться на індукторі перетворювача будь-якої форми і конструкції. Модель отримана для гармонійно змінювального в часі струму провідності. При цьому амплітудне значення різниці електричних потенціалів на клеммах електричного контуру приймача змінного магнітного поля визначено відповідно до закону Фарадея.

Цей вислів має сенс математичної моделі процесу реєстрації пружних коливань в електропровідних неферомагнітних матеріалах за допомогою ЕМАП, тобто, можливо завжди розрахувати оптимальний варіант ЕМАП потрібного призначення. Таким чином, в роботах [15–20] фактично вирішена узагальнена задача по ЕМА перетворення, але для обмежених різновидів ультразвукових хвиль. При виконанні цих теоретичних і модельних досліджень враховані нелінійні властивості феромагнітних матеріалів і їх анізотропія: залежність електромагнітних властивостей від хімічного складу, величин постійного і змінного магнітних полів; механізм виникнення магнітопружних струмів при контролі феромагнітних і неферомагнітних матеріалів. В результаті аналітично отримані хвильові і частотні характеристики моделі ЕМА перетворювачів з урахуванням всіх діючих факторів при збудженні хвиль Релея і крутильних коливань в трубчастих або стрижневих виробках.

Подальший розвиток теоретичних, модельних і експериментальних досліджень знайшло в дисертаційній роботі Мишкіна А.В. [21]. автором розроблена фізико-математична модель формування акустичних полів багатоелементних ультразвукових перетворювачів, що базується на теорії зосереджених джерел, узагальнена на випадок ЕМАП, що враховує конструктивні параметри (апертура, кількість елементів і відстані між ними, зазор між ЕМАП і ОК), параметри збудження (робоча частота, амплітудний розподіл силового впливу, фокусування, кут введення, режим роботи), пружні і електромагнітні властивості ОК, тип випромінюваної хвилі. При розрахунках використано спрощений підхід – тільки вихрострумівий силовий механізм збудження ультразвукових хвиль. При цьому отримана давно відома формула

$$A_{nv} = \frac{jB_{0s_c}}{4\pi r} e^{-k_r h \sin \theta}$$

Слід зазначити цікавий для практики контролю тонких виробів науковий результат, відзначений в роботі Мишкіна А.В. [21, с. 58]. Його розрахункові та експериментальні дані показали, що зсувні хвилі на початку ближньої зони випромінювання прямого ЕМАП спрямовані практично нормально до поверхні ОК і мають структуру близьку до однорідної. Ці дані відповідають результатам, наведеним у довіднику [4], де стверджується наявність «прожекторного» ділянки на початку ближньої зони прямого

п'єзоперетворювача (поздовжні хвилі), а також для прямого емнісного випромінювача поздовжніх ультразвукових хвиль [22]. Отже, цей фізичний ефект є універсальним. Важливо, що чутливість до дефектів в цій зоні буде практично однаковою.

Подальше вдосконалення теоретичних і модельних досліджень ЕМАП виконано в дисертаційній роботі Альохіна С.Г. [23]. Ним розроблена математична модель, в якій постійне поляризоване магнітне поле перетворювача замінено імпульсним. Основою імпульсного магніту є котушка, намотана на феромагнітний сердечник. Це призвело до появи потужних імпульсів шумів Баркгаузена значної тривалості. В результаті толщинометрія тонких виробів стала неможливою. Автор також стверджує, що при використанні імпульсного магніту індукція нормального магнітного поля досягала 2,7 Тл. При цьому амплітуда донного сигналу, в порівнянні з завадами, виявилася незначною. Наприклад, в роботі [10] співвідношення величини «донний сигнал / завада» перевищує 100 раз при поляризує чому полі до 1 Тл. Отже, роботи зі створення імпульсних поляризуєч полів, що розпочаті Малинкою А.В., продовжені Сучковим Г.М. [10] і Алексіним С.Г. [23] є перспективними та їх необхідно продовжувати.

З останніх відомих зарубіжних публікацій слід відзначити роботи Yamasaki T., Kawabe D., Prager J., Rahman M.-U, Fei Gao, Xiaohua Feng, Siyu Liu, Ruochong Zhang, Ran Ding, Rahul Kishor, Yuanjin Zheng, Shen Wang, Songling Huang, Yu Zhang, Wei Zhao, H. Boughedda, T. Hacib, M. Chelabi, H. Acikgoz, Y. Le Bihan, Zhichao Cai, Suzhen Liu, Chuang Zhang, Oingxin Yang та ін. Слід зазначити, що в теоретичному плані зарубіжні дослідження суттєво запізняються і, по суті, не відрізняються від вищезгаданих за отриманими результатами. Вони більшою мірою присвячені моделюванню, спрямованому на практичне використання результатів при ультразвуковому ЕМА контролі, дефектоскопії, оцінці напруженого стану та хімічного складу матеріалів, впливу температури.

На закінчення слід зазначити, що при аналізі доповідей з ультразвуку на 18-й Всесвітній конференції з неруйнівного контролю (2012 р.) Шевалдикін В.Г. [24] зробив висновок про зменшення інтересу до робіт з розвитку і використання ЕМА методу контролю. З іншого боку, в роботі [13] Бобров В.Г., Самокрутов А.А. і той же Шевалдикін В.Г. стверджують про значний інтерес світових розробників до досліджень ЕМА перетворення.

Аналіз результатів сотень теоретичних і практичних публікацій підтверджує значний інтерес до розробок ЕМА перетворювачів в складі дефектоскопів, товщиномірів, автоматичних і автоматизованих установок. Підтвердженням отриманого висновку є практичне застосування ЕМА способу на практиці. наприклад, ТОВ «Компанія Нордінкрафт» [25] за 20 років розробила, виготовила і впровадила в експлуатацію понад 70 установок автоматизованого ультразвукового контролю із застосуванням ЕМАП. В даний час установки компанії «Нордінкрафт» працюють на найбільших

металургійних і трубних підприємствах Росії, України, Білорусі, Китаю, Швеції, Німеччини, В'єтнаму, Південної Кореї, Японії та ін.

Висновки. Відомі теоретики за останні 20–30 років в основному вирішували спрощені задачі по «механізмам» ЕМА перетворення, в той час, як промисловості необхідні розробки принципів і основ побудови нових ЕМАП і спеціального устаткування. На сьогодні, як і раніше, не існує узагальненої теорії ЕМА перетворення, яка б комплексно враховувала всі властивості контрольованого матеріалу, поверхня або об'єм якого є елементом ЕМА перетворювача: електропровідність, магнітні, пружні і п'єзомагнітні характеристики, структуру і анізотропію, наявність деформацій і пружних напружень, форму поверхні і ін., а також конструкцію елементів ЕМАП (високочастотної котушки або котушок, джерела або джерел магнітного поля та ін.).

2. Теоретично обґрунтовано і розроблено перші моделі пристрою з фазованими елементами на базі ЕМА перетворювачів, що дозволить виконувати високопродуктивний контроль якості зварних швів.

4. Встановлена доцільність дослідження, розробки та використання імпульсних магнітних полів для підвищення можливостей ЕМАП.

Список літератури

- Буденков Г. А., Гуревич Ю.С. (1981) Современное состояние бесконтактных методов и средств ультразвукового контроля (Обзор). Дефектоскопия, №5, С. 5–33.
- Сучков Г. М. (2005) Современные возможности ЭМА дефектоскопии. Дефектоскопия, №12, С. 24–39.
- Сучков Г. М. (2004) Возможности современных ЭМА-толщиномеров. Дефектоскопия, №12, С. 16–25.
- Ермолов И. Н., Ланге Ю. В. (2004) Неразрушающий контроль: справочник: В 7 т. В. В. Клюев (ред.). Ультразвуковой контроль. Т. 3. Москва, Машиностроение.
- Ермолов И. Н. (2004) Достижения в теоретических вопросах ультразвуковой дефектоскопии, задачи и перспективы. Дефектоскопия, №10, С. 13–48.
- 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.
- Буденков Г. А., Коробейников О. В. (2009) Влияние химического состава и температуры металлов на эффективность электромагнитно-акустического преобразования. Дефектоскопия, №4, С. 41–49.
- Сучков Г. М., Донченко А. В., Десятниченко А. В. и др. (2008) Повышение чувствительности ЭМА приборов. Дефектоскопия, №2, С. 15–22.
- Сучков Г. М. (2001) Исследование особенностей распространения упругих волн, возбуждаемых ЭМА способом. Контроль. Диагностика, №12, С. 36–39.
- Сучков Г. М. (2005) Развитие теории и практики создания приборов для электромагнитно-акустического контроля металлоизделий: докт. дис. Харьков, НТУ «ХПИ».
- Ремезов В. Б. (2013) Исследование акустических полей, возбуждаемых излучателем типа «виток» в постоянном магнитном поле. Дефектоскопия, №6, С. 13–25.
- Мигущенко Р. П., Сучков Г. М., Петрищев О. Н. и др. (2017) Информационно-измерительные электромагнитно-акустические преобразователи для оценки качества поверхности ферромагнитных металлоизделий ультразвуковыми волнами Релея. Техническая электродинамика, №2, 7С. 0–76.
- Бобров В. Т., Самокрутов А. А., Шевальдыкин В. Г. (2014) Состояние и тенденции развития акустических (ультразвуковых) методов, средств и технологий неразрушающего контроля и технической диагностики. Территория NDT, №2, С. 24–27.
- Чабанов В. Е., Жуков В. А. (2013) Особенности ультразвукового контроля с применением электромагнитно-акустических преобразователей. В мире неразрушающего контроля, №1, С. 36–43.
- Плеснецов С. Ю., Петрищев О. Н., Мигущенко Р. П., Сучков Г. М. (2017) Моделирование процесса электромагнитно-акустического преобразования при возбуждении крутильных волн. Техническая электродинамика, №3, С. 79–88.
- Plesnetsov S. Yu., Petrishchev O. N., Mygushchenko R. P., Suchkov G. M. (2018) Simulation of electromagnetic-acoustic conversion process under torsion waves excitation. Part 2. Tekhnichna Elektrodynamika, №1, С. 30–36.
- Plesnetsov S. Yu., Petrishchev O. N., Mygushchenko R. P., Suchkov G. M. (2018) Simulation of electromagnetic-acoustic conversion process under torsion waves excitation. Part 3. Ibid, №3, С. 10–19.
- Сучков Г. М., Петрищев О. Н., Плеснецов С. Ю. (2016) Разработка основ электромагнитно-акустического возбуждения крутильных волн в трубчатых металлоизделиях. Тезисы XXII Международной н.-пр. конф. «Физичні та комп'ютерні технології», 7–9 грудня 2016 р., Харків, С. 469–473.
- Plesnetsov S. Yu., Migushchenko R. P., Petryshev O. N. et al. (2017) Mathematical modeling of physical processes of electromagnetic field transformation in elastic oscillations field in microthick layers of metals. Journal of nano- and electronic physics, №9, С. 5.
- Plesnetsov S. Yu., Petrishchev O. N., Mygushchenko R. P. et al. (2018) Physical principles of non-contact ultrasonic frequency sensors creation for the study of nanocrystalline ferromagnetic materials. Ibid, 2. (Preprint).
- Мышкин А. В. (2015) Влияние конструктивных параметров многоэлементных фазированных преобразователей на формирование акустических полей: автореф. канд. дис. Ижевск, ИЖГТУ.
- Ноздрачева Е. Л., Сучков Г. М., Петрищев О. Н. (2015) Особенности возбуждения ультразвуковых импульсов емкостным преобразователем. 36. наук. праць Донецького національного технічного університету, серія: «Обчислювальна техніка та автоматизація», С. 165–171.
- Алехин С. Г. (2013) Толщинометрия металлоконструкций на основе электромагнитно-акустического преобразования в импульсном магнитном поле: канд. дис. Москва, МНПО «Спектр».
- Шевальдыкин В. Г. (2012) Краткий анализ тем докладов по ультразвуку 18-й Всемирной конференции по неразрушающему контролю. Территория NDT, №3, С. 33–34.
- www.nordinkraft.de

References (transliterated)

- Budenkov G. A., Gurevich Yu.S. (1981) Sovremennoe sostoyanie beskontaktnykh metodov i sredstv ultrazvukovogo kontrolya (Obzor). Defektoskopiya, No 5, P. 5–33.
- Suchkov G. M. (2005) Sovremennye vozmozhnosti EMA defektoskopii. Defektoskopiya, No 12, P. 24–39.
- Suchkov G. M. (2004) Vozmozhnosti sovremennykh EMA-tolshinomerov. Defektoskopiya, No 12, P. 16–25.
- Ermolov I. N., Lange Yu. V. (2004) Nerazrushayushiy kontrol: spravochnik: V 7 t. V. V. Klyuev (red.). Ultrazvukovoy kontrol. Vol. 3. Moskva, Mashinostroenie.
- Ermolov I. N. (2004) Dostizheniya v teoreticheskikh voprosah ultrazvukovoy defektoskopii, zadachi i perspektivy. Defektoskopiya, No 10, P. 13–48.
- Sazonov Yu. I. (2014) Elektromagnitno-akusticheskie efekty v kondensirovannykh sredah i fizicheskie metody ih ispolzovaniya. XXVII sessiya Rossijskogo akusticheskogo obshestva, posv. pamyati uchenyh-akustikov FGUP «Krylovskij gosudarstvennyj nauchnyj centr» A. V. Smolyakova i V. I. Popkova. S.-Peterburg, 16–18 aprelya 2014.
- Budenkov G. A., Korobejnikov O. V. (2009) Vliyanie himicheskogo sostava i temperatury metallov na effektivnost elektromagnitno-akusticheskogo preobrazovaniya. Defektoskopiya, No 4, P. 41–49.
- Suchkov G. M., Donchenko A. V., Desyatnichenko A. V. i dr. (2008) Povyshenie chuvstvitelnosti EMA priborov. Defektoskopiya, No 2, P. 15–22.
- Suchkov G. M. (2001) Issledovanie osobennostej rasprostraneniya uprugih voln, vzbuzhdaemyh EMA sposobom. Kontrol. Diagnostika, No 12, P. 36–39.

10. Suchkov G. M. (2005) Razvitie teorii i praktiki sozdaniya priborov dlya elektromagnitno-akusticheskogo kontrolya metalloizdelij: dokt. dis. Harkov, NTU «HPI».
11. Remezov V. B. (2013) Issledovanie akusticheskikh polej, vzbuzhdaemykh izluchatelem tipa «vitok» v postoyannom magnitnom pole. Defektoskopiya, No 6, P. 13–25.
12. Migushenko R. P., Suchkov G. M., Petrishev O. N. i dr. (2017) Informacionno-izmeritelnye elektromekhanicheskie preobrazovateli dlya ocenki kachestva poverhnosti ferromagnitnykh metalloizdelij ultrazvukovymi volnami Releya. Tehnichna elektrodinamika, No 2, P. 70–76.
13. Bobrov V. T., Samokrutov A. A., Shevaldykin V. G. (2014) Sostoyanie i tendencii razvitiya akusticheskikh (ultrazvukovykh) metodov, sredstv i tehnologiy nerazrushayushogo kontrolya i tehnichej diagnostiki. Territoriya NDT, No 2, P. 24–27.
14. Chabanov V. E., Zhukov V. A. (2013) Osobennosti ultrazvukovogo kontrolya s primeneniem elektromagnitno-akusticheskikh preobrazovatelej. V mire nerazrushayushogo kontrolya, No 1, P. 36–43.
15. Plesnetsov S. Yu., Petrishev O. N., Migushenko R. P., Suchkov G. M. (2017) Modelirovanie processa elektromagnitno-akusticheskogo preobrazovaniya pri vzbuzhdenii krutilykh voln. Tehnichna elektrodinamika, No 3, P. 79–88.
16. Plesnetsov S. Yu., Petrishchev O. N., Mygushchenko R. P., Suchkov G. M. (2018) Simulation of electromagnetic-acoustic conversion process under torsion waves excitation. Part 2. Tehnichna Elektrodinamika, No 1, P. 30–36.
17. Plesnetsov S. Yu., Petrishchev O. N., Mygushchenko R. P., Suchkov G. M. (2018) Simulation of electromagnetic-acoustic conversion process under torsion waves excitation. Part 3. Ibid, No 3, P. 10–19.
18. Suchkov G. M., Petrishchev O. N., Plesnecov S. Yu. (2016) Razrabotka osnov elektromagnitno-akusticheskogo vzbuzhdeniya krutilykh voln v trubchatykh metalloizdeliyah. Tezi HHII Mizhnarodnoyi n.-pr. konf. «Fizichni ta komp'yuterni tehnologiyi», 7–9 grudnya 2016 r., Harkiv, P. 469–473.
19. Plesnetsov S. Yu., Migushchenko R. P., Petryshev O. N. et al. (2017) Mathematical modeling of physical processes of electromagnetic field transformation in elastic oscillations field in microthick layers of metals. Journal of nano- and electronic physics, No9, P. 5.
20. Plesnetsov S. Yu., Petrishchev O. N., Mygushchenko R. P. et al. (2018) Physical principles of non-contact ultrasonic frequency sensors creation for the study of nanocrystalline ferromagnetic materials. Ibid, 2. (Preprint).
21. Myshkin A. V. (2015) Vliyanie konstruktivnykh parametrov mnogoelementnykh fazirovannykh preobrazovatelej na formirovanie akusticheskikh polej: avtoref. kand. dis. Izhevsk, IzhGTU.
22. Nozdracheva E. L., Suchkov G. M., Petrishev O. N. (2015) Osobennosti vzbuzhdeniya ultrazvukovykh impulsiv emkostnym preobrazovatelem. Zb. nauk. prac Doneckogo nacionalnogo tehnicnogo universitetu, seriya: «Ob- chislyvalna tehnika ta avtomatizaciya», P. 165–171.
23. Alehin S. G. (2013) Tolshinometriya metallokonstrukcij na osnove elektromagnitno-akusticheskogo preobrazovaniya v impulsnom magnitnom pole: kand. dis. Moskow, MNPO «Spektr».
24. Shevaldykin V. G. (2012) Kratkij analiz tem dokladov po ultrazvuku 18-j Vsemirnoj konferencii po nerazrushayushemu kontrolyu. Territoriya NDT, No 3, P. 33–34.
25. www.nordinkraft.de

Надійшла (received) 20.09.2019

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

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

*M. TARANENKO, I. TARANENKO***INTERACTIVE CONTROLLING AT LARGE-DIMENSIONAL ARTICLES FORMING**

Physical phenomenon of warping (springing) can be observed as a technological heritage after large-dimensional articles forming or curing and consequent cooling of composite articles. This phenomenon can be seen as gaps between ready article contour and forming jig contour. Deviation degree of ready article surface from theoretical contour and article dimensions has to be controlled during manufacturing. Application of auxiliary controlling jig leads to expenses and labor-manufacturability increasing.

Possibility of application forming jig with inserted jet gages is considered for articles shape controlling.

Such gages and realization of acoustic methods allow to control not only final article shape but also geometry on intermediate stages of manufacturing.

Key words: forming, controlling, controlling of shape and dimensions (gaps), air (pneumatic) jet gages, acoustic method of controlling of manufacturing process, forming jig.

*M. E. ТАРАНЕНКО, И. М. ТАРАНЕНКО***ИНТЕРАКТИВНЫЙ КОНТРОЛЬ ПРИ ФОРМООБРАЗОВАНИИ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ДЕТАЛЕЙ**

После формообразования крупногабаритных листовых деталей из листовых механических заготовок или полимеризации и охлаждения деталей из композитных материалов проявляется технологическая наследственность в виде коробления (пружинения). Это наблюдается в виде неприлегания готовой детали к формозадающей поверхности технологической оснастки. При контроле качества формоизменения необходимо измерять степень нарушения формы и размеров. Применение контрольной оснастки дорого и трудоемко.

Рассмотрена возможность использования для контроля формозадающей оснастки с установленными в ней воздушными струйными датчиками.

Такие датчики и применение акустических методов позволяют контролировать не только конечную форму заготовки, но и форму заготовки на предварительных этапах формоизменения.

Ключевые слова: формообразование, контроль формы и размеров (зазоров), воздушные (пневматические) струйные датчики, акустический метод контроля протекания процесса, формозадающая оснастка.

*M. E. ТАРАНЕНКО, И. М. ТАРАНЕНКО***ИНТЕРАКТИВНИЙ КОНТРОЛЬ ПРИ ФОРМОУТВОРЕННІ БАГАТОГАБАРИТНИХ ДЕТАЛЕЙ**

Після формоутворення багатогабаритних листових деталей з листових механічних заготовок або полімеризації і охолодження деталей з композитних матеріалів проявляється технологічна спадковість у вигляді викривлення (пружнення). Це спостерігається у вигляді неприлягання готової деталі до формозадаючої поверхні технологічного оснащення. При контролі якості формозміни необхідно вимірювати ступінь порушення форми і розмірів. Застосування контрольної оснастки дорого і складно.

Розглянуто можливість використання для контролю формозадаючої оснастки з встановленими в ній повітряними струминними датчиками.

Такі датчики і застосування акустичних методів дозволяють контролювати не тільки кінцеву форму заготовки, а й форму заготовки на попередваріантних етапах формозміни.

Ключові слова: формоутворення, контроль форми і розмірів (зазорів), повітряні (пневматичні) струменеві датчики, акустичний метод контролю протікання процесу, формозадаюча оснастка.

Nomenclature

P_{feed}	-	Feeding pressure	[Pa]
P_{out}	-	Output pressure	[Pa]
L_H	-	Level of sound pressure	[dB]

Introduction. Articles produced by sheet metal forming are generally considered as large-dimensional ones if their overall dimensions are more than 1.0 m. In majority of cases such articles have on their outer surface local stiffening elements like ribs, bevels, conjugated surfaces with low radii of curvature. To create such zones with required quality one has to apply elevated pressure or forces comparing with that need for creation of general geometry of an article. Typically to such articles one can relate car body panels, antenna mirrors for satellite and space communication, articles of skin and facings of aircrafts. Metal sheet articles are produced by mechanical presses, hydraulic presses by means of forming by elastic and liquid medium and by electrohydraulic presses with consequent local load application.

Semi-finished composite articles after preliminary stages of forming are cured and cooled in contact with

shape-creating surfaces of technological jig.

Necessity of interactive control of large-dimensional articles manufacturing, i.e. controlling of process or semi-finished articles state during manufacturing is stipulated by means of series of factors:

1. By high requirements to articles quality, precision of their radii and shapes. For some mentioned types of articles allowable deviation of shape of jig geometry doesn't exceed 0.3...0.5 mm.

2. By high labor-intensity of dimensions and shape of non-rigid articles. Forming jig is the unique carrier of geometrically net parameters at conditions of such articles forming. This means that control can be conducted by means of determination of articles shape deviation from jig surface. The same idea related to composite articles.

3. By relatively high warping of ready articles caused by residual stress action. For some prospective structural materials degree of warping can reach values comparable with articles dimensions.

4. By not very precise applied load or pressure which depend on quite wide value of allowances on mechanical properties of article material. For some materials allowances on margin of strength and margin of yielding reach 20% of nominal value. Nominal value

© M. Taranenko, I. Taranenko, 2019

depends significantly on rolling direction or deviations of reinforcing fibers direction. Therefore, not precise loading leads to articles quality reduction.

All above-mentioned factors can be eliminated and get high-quality articles at correct composing of manufacturing process based on knowledge of deformable article state in processing and degree of semi-finished article contacting to forming jig surface.

The goal of paper is to research possibility of controlling methods application of semi-finished article position with respect to forming jig and equipment operation diagnostics, which don't require significant jig re-composing, used controlling and diagnostical equipment and in optimal case – application of contactless controlling methods.

To increase possibility of article spinning controlling with respect to forming jig different methods and structural solutions of different spaces measurements are considered. They are

To estimate controlling possibility of semi-finished article adjacency to forming jig surface different structures and methods of measuring typical distances have been analyzed. They include application of such methods as potentiometric, capacitive, inductive gages and static methods of measuring. Taking into account their advantages they have such disadvantages as necessity to provide electrical wires and contacts in operational zone. The contacts are subjected to contamination and have low reliability. Electrical contacts can be freely damaged by movable parts of jig or semi-finished article.

In such conditions the gages of distance most suitable for practical application are air jet gages of distance [1–3]. Their advantages are:

- the simplicity – gage consists of the single part – the nozzle exactly;
- high precision of distance measuring from 0 up to 10 mm;
- low feeding pressure of compressed air;
- resistance to vibrations, electrical noise disturbance and contaminations;

The surface of forming jig is considered as reference surface that allows escape of auxiliary measuring devices.

Some variants of application and installation of gages are shown on the Fig. 1 and Fig. 2.

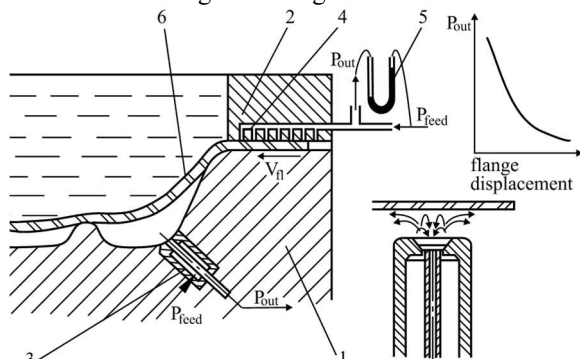


Fig. 1 – Variants of air jet gage location for controlling parameters of forming: 1 – jig; 2 – pressure plate; 3 – transducer for determination gapping between blank and die; 4 – gage for determination of flange drawing; 5 – micro-pressure gage; 6 – blank

It is recommended to install gages 4 (Fig. 1) in holding-down plate 2 and orient them in radial direction to register uniformity of flange material drawing over article perimeter.

In initial state a flange of a semi-finished article 6 overlaps holes for air exhausting and air consumption through gage is minimal. By the flange drawing process to female die cavity air consumption through gage increases that leads to reduction of pressure P_{feed} in feeding system.

Feeding pressure is registered by pressure gage (shown as a U-like tube on the Fig. 1).

Such changing of pressure by signal value is proportional to the flange displacement. If signals got from several gages disposed uniformly by flange perimeter are compared one can determine easily location of zones with more intensive drawing. After several consequent recalculations of position of exact zone of a blank can be determined precisely.

It is recommended to use differential (double-channel) gage 3 to determine blank position with respect to jig 1 at zones where blank touches to a jig tightly in last turn. Feeding stream of air passes through outer channel. Air jets reflect from blank surface at nozzle leaving section. Pressure at the central zone of a gage increases and one can make conclusion about distance from the blank surface up to gage edge by means of this pressure changing. The dependence of transformer outer signal is proportional to the third degree of distance between blank and jig surfaces. This approach permits to find gaps between jig and blank quite precisely.

Possible arrangement of jet gages positioning at composite shells forming is shown on the Fig. 2.

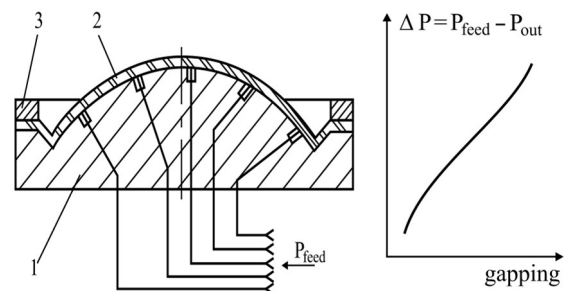


Fig. 2 – Variant of air jet-pipe gages location for determination gapping between shell and forming jig:

1 – forming jig; 2 – article; 3 – holding down element; transducer case; P_{feed} – feeding pressure; P_{out} – measuring parameter

Installation of air jet gages inside jig is not very complicated and required tooling for pressure measurement is relatively simple too. Air input to gaps between jig and blank makes ready article removing from jig to be easier and allows to escape of different kind of ejecting pins.

Above-described method of article position controlling allows to get results with high precision without article removing from the jig that make controlling got be easier. But at the same time jig structure has to be more complicated and special registration equipment (mainly,

pipng systems) is required. This fact doesn't simplify architecture of technological zone. Therefore, this method can be recommended is case contactless methods of measuring necessity.

Acoustic methods also belong to contactless measuring ones. These methods are widely used in industry for diagnostics of building and structures (bridges, big chemical columns etc). An object under analysis is preliminary loaded with short acoustic or mechanical signal of definite frequency and then the object acoustic response on disturbing impulse is registered.

Short loading impulse can be used in case of research of impulse forming equipment as disturbing one. This impulse causes oscillations of a part of studying object (blank, chamber, discharger etc). The objective of studying was determination of correspondence of registered parameters of sound signals to changing parameters of entire process.

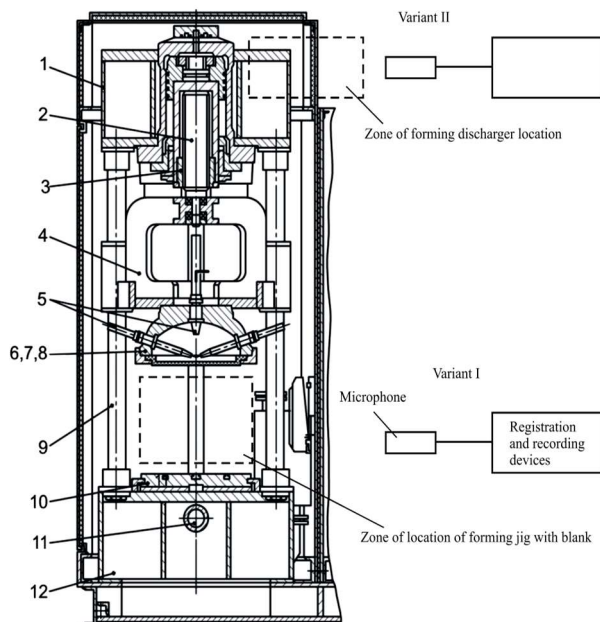


Fig. 3 – Scheme of arrangement of electrohydraulic press and location of microphones (two variants) for sound signals recording: variant I – at recording of sound signals from blank and total released energy; variant 2 – at recording of sound signals of energy feed to operational zone of press; 1 – upper crosshead with water tank; 2 – compressing hydro-cylinder; 3 – mechanism for regulation stroke of movable crosshead; 4 – movable crosshead of frame type; 5 – side and upper operational electrodes; 6 – discharge chamber; 7 – elastic diaphragm; 8 – compressing ring of diaphragm; 9 – column; 10 – retractable table; 11 – hydro-cylinder of retractable table; 12 – lower crosshead

Acoustic method is suggested for determination degree of article forming and diagnostics of equipment operation at application of consequent local forming of large-dimensional sheet articles on electro-hydraulic presses [4]. The essence of the method is in registration and special processing of acoustic signals radiated by sheet article at impulse loading, blank interaction with jig at reciprocal impact and impulse signals of equipment elements. Blank as itself is a membrane, cases of discharge chambers, jig, cases of discharger and other elements

release sound signals at impulse loading proportional to quantity of energy released at discharge on frequency determined by above-mentioned elements rigidity. Series of experiments were conducted in National Aerospace University "KhAI". The main objective of them was to establish correlation dependencies of acoustic indexes on degree of blank shape changing and state of energy releasing by electro-hydraulic press. Scheme of testing used is shown on the Fig. 3.

Microphone of noise-measuring device connected to electronic oscillograph for visual signal recording was disposed very close to studying object, for example, discharge chamber with blank held down to jig (variant I). Electro-hydraulic discharges were conducted by press and acoustic signals from them were registered. Blank was deformed by consequent discharges with applied energy 13.5 kJ. Disturbance of energy releasing system was imitated by means of interelectrode spacing changing.

Dependencies established by results of experiments are shown on the Fig. 4.

Following conclusions can be done. More released energy more level of sound pressure (Fig. 4, b). This dependence become more drastic with increasing frequency of octaves from 63.5 Hz to 250 Hz. Confidence interval of mentioned dependences at 95% reliability lay in range of 2...5 % of registered value (shown on the diagram by vertical lines).

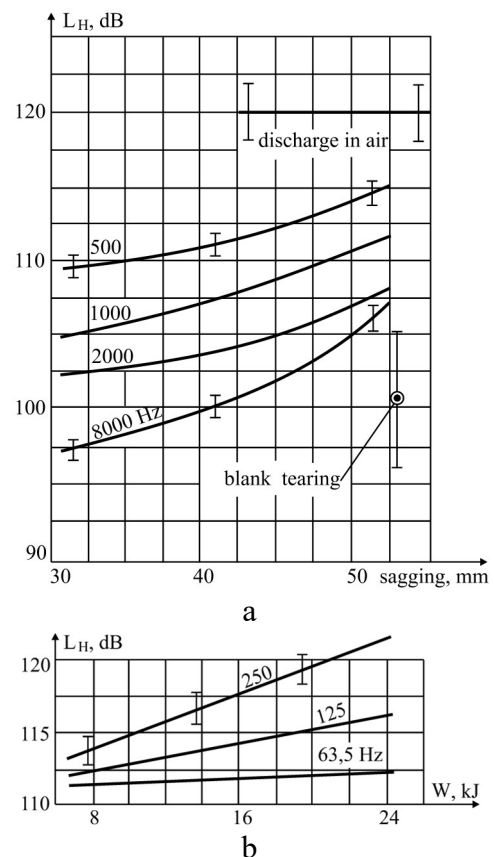


Fig. 4 – Dependence of sound pressure level: a – on blank sagging at different octaves; b – on saved energy at forming of bottoms of steel 08кп, thickness 1.0 mm

Dependence of sound pressure level on blank sagging (i.e. its rigidity) is established. It is shown on the Fig. 4 that, generally, more sagging more value of registered parameter generated at electro-hydraulic discharge. This dependence is quite weak at frequencies 63.5 and 125 Hz but more drastic at higher frequencies. The graph shows the points corresponding to blank tearing ($L_H \approx 101 \pm 4.5$ dB) and to discharge in empty female-die (calibration of blank is simulated) – $L_H \approx 101 \pm 4.5$ dB. Last two values are linearized by octaves values of L_H .

Dependencies obtained can be explained by following reasons. At the beginning of deformation when blank is more compliant energy released is spent mainly on plastic forming of blank and its small amount is reflected from blank and causes oscillations of technological tooling. Then more sagging of blank more its rigidity and ratio of absorbed and reflected portions of energy changed to last one. Therefore, more blank sagging more level of sound pressure generated by blank. Blank rigidity reduces sharply at blank tearing that leads to reduction of L_H value. At blank calibration more portion of energy released transfers to acoustic mode.

Significantly drastic dependence of L_H on sagging at frequencies 2000...8000 kHz can be explained by higher oscillation frequency of deformed blank in comparison with flat one. Close frequency passed through registration channel to blank Eugen frequency more drastic dependence of sound pressure level on sagging observed in experiments.

Blank deformation under electro-hydraulic discharge happens by oscillations of more complicated form. Oscillations with two and more harmonics, corresponding to different forms of oscillations, are observed [4]. Analysis of oscillations of deformable blank in frames of S. P. Timoshenko's theory for experimental conditions gives two values of Eugen frequency: main one is 50...10 Hz and higher one – 1.0...2.0 kHz. Typical frequencies observed in experiment was 1.0...2.0 kHz. It can be seen that analytical and experimental values are quite close. Harmonics observed on oscillograms of less frequency can relate to oscillations of press structure and jig.

More thorough experimental dependencies can be also obtained for composite articles manufacturing.

Following conclusion by experimental studies. It was established experimentally that at forming of sheet blanks on electrohydraulic press:

1. There is the correlation dependence between depth of blank forming (sagging) and the value of sound pressure of generated signal. This dependence is more drastic on frequencies corresponding to main frequency of oscillations for a blank considered as membrane.

2. There is the correlation dependence between level of sound pressure of generated signal and quantity of energy released at discharge. Such dependence can be used for interactive control of released energy at electro-hydraulic discharge. This dependence is well defined at

frequencies more than 250 kHz. One can assume that more drastic dependencies can be observed at frequencies corresponding to oscillation frequency of discharge chamber.

It can be considered that further development of the method is quite prospective for interactive controlling of blank state and diagnostics of equipment operation.

Conclusions. Two methods of interactive control of processes happened at sheet forming are suggested. These methods differ by precision of estimation of forming articles of different shape and dimensions, by complexity of technological zone organizing and by presence or absence of mechanical contact between technological jig and measuring or registering devices.

More auxiliary methods of interactive control of forming of large-dimensional articles are also studied in National Aerospace University "KhAI".

Список литературы

1. Залманзон, Л. А. Теория элементов пневмоники [текст]: / Л. А. Залманзон. – М. : Физматгиз, 1969, 568 с.
2. Дылев, В. И. Применение струйных датчиков в комплексах оборудования с промышленными роботами [текст]: / В. И. Дылев. А. С. Шаров. – Минск, Вестник машиностроения, № 6, 1978. – С. 18–20.
3. Баселаев, В. Н. Исследование струйных датчиков расстояния [текст] / В. Н. Баселаев, В. К. Даниленко и М. П. Чайко / В сб. «Вопросы струйной техники». – Минск, 1975. – С. 164 – 177.
4. Тараненко, М. Е. Электрогидравлическая штамповка: теория, оборудование, техпроцессы [текст]: монография в 2 ч. [текст] / М. Е. Тараненко. – Х., Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», 2011, 272 с.
5. Горюнов В. А. Разработка метода повышения эффективности струйных управляющих устройств систем автоматического управления технологическим оборудованием [текст]: автореферат дис. ... кандидата технических наук : 05.13.06 / Волгогр. гос. техн. ун-т. – Волгоград, 2001. – 19 с.
6. Рачков М. Ю. Технические измерения и примеры : учебник и практикум для вузов [текст] / М. Ю. Рачков / — 3-е изд., испр. и доп. — Москва : Издательство Юрайт, 2019. — 151 с. — ISBN 978-5-534-07525-0.

References (transliterated)

1. Zalmanzon L.A. Theory of pneumatic elements. Phizmatgiz, Moscow, 1969, 568 p.
2. Dylev V.I., Sharov A.S. Application of jet-pipe transducers in complexes with industrial robotic equipment. Herald of Machine-building: Collection of Scientific Papers. Minsk, No.6, 1978, pp. 18–20.
3. Baselayev V.N., Danilenko V.K., Chaiko M.P. Studying of jet-pipe transducers of distances. Problems of jet engineering: Collection of Scientific Papers. Minsk, 1975, pp. 164 – 177.
4. Taranenko M.Ye. Electro-hydraulic forming: theory, equipment, manufacturing processes: monograph (in 2 parts). Zhukovsky National Aerospace University "KhAI". Kharkiv, 2011, 272 p.
5. Gorunov V.A. Developin gofthemethod of improving efficiency of jet control systems for automatic controlling of manufacturing facilities. The sisonc and idate of science degree, 2001, Volgograg, 162 p.
6. Rachkov M.Yu. Technical measurements and equipment: textbook and practical book. Moscow, 3rd edition, Urait Publishing. – 2019, 151 p. — ISBN 978-5-534-07525-0.

Надійшла (received) 29.05.2019

Відомості про автора / Сведения об авторе / About the Author

Тараненко Михайл Євгенєвич (Тараненко Михайло Євгенєвич, Mykhaylo Taranenko) – доктор технічних наук, професор, Національний аерокосмічний університет ім. Н. Е. Жуковського «Харьківський авіаційний інститут, зав. кафедрою автомобілей і транспортної інфраструктури; ул. Чкалова, 17, 61070, г. Харьков, Україна; тел.: (057) 788-41-70, m.taranenko@khai.edu

Тараненко Ігорь Михайлович (Тараненко Ігор Михайлович, Igor Taranenko) – кандидат технічних наук, професор, Національний аерокосмічний університет ім. Н. Е. Жуковського «Харьківський авіаційний інститут, кафедра композитних структур і авіаційних матеріалів; ул. Чкалова, дом. 17, 61070, г. Харьков, Україна; тел.: +38-097-448-34-25, igor.taranenko@khai.edu

УДК 628.16:621.981.3

О. І. ТРИШЕВСЬКИЙ, М. В. САЛТАВЕЦЬ, Д. С. ВОРОБІЙОВ**МЕТОДИКА РІШЕННЯ ЗВОРОТНИХ ЗАДАЧ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ**

Встановлено, що для рішення зворотних задач теплопровідності найбільш придатним є екстремальний метод підбора (проб), який дозволяє використовувати сучасну обчислювальну техніку, за рахунок чого час і вартість рішення мінімальні, а точність – достатня для інженерних розрахунків. Визначено склад обладнання і створено обчислювальний комплекс для обробки результатів експериментальних досліджень процесів нагріву полоси в печі, процесів теплообміну полоси і інструменту в зоні деформації при прокатці, а також процесу примусового охолодження полоси в технологічному циклі. В склад комплексу входять персональний комп'ютер та самостійно розроблений сітковий процесор, підсилювач аналогового сигналу, аналогово-цифровий перетворювач і пакет програм для забезпечення роботи комплексу.

Ключові слова: тонкий лист, гаряча прокатка, методика експериментальних досліджень, теплопровідність, зворотні задачі, коефіцієнти теплообміну, коефіцієнти тепловіддачі, аналогово-цифровий обчислювальний комплекс, R–R сітковий процесор.

О. И. ТРИШЕВСКИЙ, Н. В. САЛТАВЕЦ, Д. С. ВОРОБЬЁВ**МЕТОДИКА РЕШЕНИЯ ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ ТЕПЛОПРОВодНОСТИ**

Установлено, что для решения обратных задач теплопроводности наиболее подходящим является экстремальный метод подбора (проб), который позволяет использовать современную вычислительную технику, за счет чего время и стоимость решения минимальны, а точность – достаточна для инженерных расчетов. Определен состав оборудования и создан вычислительный комплекс для обработки результатов экспериментальных исследований процессов нагрева полосы в печи, процессов теплообмена полосы и инструмента в зоне деформации при прокатке, а также процесса принудительного охлаждения полосы в технологическом цикле. В состав комплекса входят персональный компьютер и самостоятельно разработанный R–R сеточный процессор, усилитель аналогового сигнала, аналогово-цифровой преобразователь и пакет программ для обеспечения работы комплекса.

Ключевые слова: тонкий лист, горячая прокатка, методика экспериментальных исследований, теплопроводность, обратные задачи, коэффициенты теплообмена, коэффициенты теплоотдачи, аналогово-цифровой вычислительный комплекс, R-R сеточный процессор.

О. I. TRISHEVSKY, N. V. SALTAVETS, D. S. VOROBYEV**TECHNIQUE OF SOLUTION OF REVERSE TASKS OF HEAT CONDUCTION**

It has been established that for solving inverse heat conduction problems the most suitable is the extreme method of selection (samples), which allows using modern computing equipment, due to which the time and cost of the solution are minimal, and accuracy is sufficient for engineering calculations. The composition of the equipment has been determined and a computing complex has been created for processing the results of experimental studies of strip heating in a furnace, strip heat exchange and tool processes in the deformation zone during rolling, as well as the process of forced cooling of the strip in the technological cycle. The complex includes a personal computer and an independently developed R – R grid processor, an analog signal amplifier, an analog-to-digital converter and a software package for the operation of the complex. The value of the heat transfer coefficient, which is determined from the solution on the R-R – network processor, by an implicit finite negative method, is substituted for the control solution of the direct problem on the PC by an explicit finite-negative method. If the values of the model temperature coincide with the experimental one, the solution is recognized as correct and is entered into the database. If the error exceeds the allowable, the solution must be repeated.

Key words: thin sheet, hot rolling, experimental research, thermal conductivity, inverse problems, heat transfer coefficients, heat transfer coefficients, analog-digital computing complex, R-R grid processor.

Вступ. Аналіз технічного стану обладнання заводів України і технологій виготовлення полоси на цих заводах і порівняння існуючого обладнання з обладнанням і технологіями сучасного виробництва гарячої полоси за кордоном показали що:

У промислових розвинених країнах (Німеччина, Японія, Франція, Канада, США, Італія, Південна Корея) проводяться дослідження технології прокатного виробництва гарячекатаної полоси з метою скорочення витрат на виробництво тони прокату (економія палива, електроенергії, металу) за рахунок скорочення часу технологічного процесу. Для досягнення цієї мети, на основі математичного моделювання технологічного процесу з уточненням окремих положень під час натурних експериментів, створено ливарно-прокатні агрегати.

Але, наведена в технічній літературі інформація, щодо досягнень в розробці нових технологій, має рекламний характер, або такий, що вводить в оману і не може бути використана для розробки обладнання і технології.

На Україні обладнання і технологія прокатки полоси були створені відповідно до вимог часу їх

побудови, із застосуванням злитків великих розмірів при мінімумі обладнання. Така технологія потребує неодноразового нагріву прокату і внаслідок цього визначається великими витратами енергії на виробництво тони прокату.

Технології прокатки полоси на Україні потребують докорінних змін з урахуванням вимог економії енергії для зменшення собівартості готової продукції шляхом удосконалення обладнання і режимів обтиснень з урахуванням теплового стану полоси.

Актуальність виконаних досліджень. Вимоги сучасного ринку листопрокатної продукції диктують необхідність підвищення конкурентоспроможності виробленого листа за рахунок зниження його собівартості без втрати якості. Зокрема, це спонукає металургів шукати нові технологічні схеми прокатки тонкого гарячекатаного листа, який за якістю і рівнем властивостей не поступається або наближається до гарячекатаного. Так, відносно недавно з'явився новий технологічний процес прокатки, сутність якого полягає у використанні системи прискореного охолодження полоси між чорною та чистою

групами клітей листопрокатного стану, а також прискореного охолодження полоси за чистовою групою з метою отримання гарячекатаної полоси товщиною до 0,7 мм. Але, на жаль, до цього часу не вирішеною залишається проблема охолодження полоси і валків при мінімумі розходу енергії, що дозволило би більш ефективно використовувати існуюче обладнання для здійснення нового технологічного процесу.

Для підготовки практичних рекомендацій щодо удосконалення технології необхідно розробити математичні моделі теплового стану полоси від входу в чорнову групу клітей до змотування готової полоси у рулон та провести відповідні експериментальні дослідження.

В даний час, практично у всіх областях техніки, моделювання є обов'язковим елементом у процесі створення, іспитів і впровадження нових об'єктів техніки. Моделювання, як метод дослідження, застосовується на етапі різних видів натурних іспитів, що визначають характеристики об'єктів.

Тому завдання, пов'язані з удосконаленням технологічних процесів прокатки тонколистової сталі, зокрема, раціонального охолодження смуги і валків при мінімальному витрачанні енергії з метою зниження собівартості є важливими і актуальними.

Мета роботи. Враховуючи значну трудомісткість та вартість експериментальних досліджень процесів гарячої прокатки тонкого листа, необхідно попередньо розробити найбільш раціональну методику виконання експериментальних досліджень цього складного процесу, яка дозволяла би отримувати необхідні результати з найменшими витратами. Тому **метою виконаних досліджень** є розробка раціональної методики виконання експериментальних досліджень гарячої прокатки тонкого листа з визначенням коефіцієнтів теплообміну між металом і валками, а також коефіцієнтів тепловіддачі до води для використання отриманих значень в граничних умовах математичної моделі при розрахунку систем керування тепловим станом полоси і валків.

Для досягнення цієї мети в роботі поставлені та вирішені наступні задачі.

- Вибраний метод рішення зовнішньої зворотної задачі теплопровідності.
- Вибраний метод рішення внутрішньої (інверсної) зворотної задачі теплопровідності.
- Вибрані обчислювальні засоби для рішення зворотних задач.

Основні результати досліджень.

Метод рішення зворотних задач теплопровідності.

Зовнішня зворотна задача теплопровідності може бути вирішена (тобто знайдено коефіцієнт тепловіддачі, якщо ми будемо мати експериментальні данні про температуру середовища і температуру поверхні полоси або валків [1, 2].

Інверсні (або внутрішні зворотні) задачі – це такі задачі, у яких визначаються коефіцієнти усередині основного рівняння (значення коефіцієнтів

теплопровідності, питомої теплоємності та питомої ваги).

Відомо, що найбільш ефективними, з існуючих на сьогодні методів рішення зворотних задач, є екстремальні методи. При виборі оптимального методу рішення основними критеріями є точність, час і вартість рішення, можливість використання обчислювальної техніки. З цього погляду найбільш придатним є метод підбора (проб) [3].

Сутністю його є підстановка у рівняння теплопровідності найбільш вірогідного значення коефіцієнта тепловіддачі. Отримане значення теоретичної температури порівнюється з температурою зафіксованою під час експерименту. Оцінюється розбіжність експериментальної і теоретичної температури. У разі перевищення допустимої похибки, ітераційним шляхом підбирається значення коефіцієнта тепловіддачі при якому похибка є мінімальною.

При використанні R-R – сіткового процесора процес рішення спрощується. Оператор встановлює збіг значень теоретичної і експериментальної температур шляхом регулювання опору, що моделює значення коефіцієнта тепловіддачі. Після чого обчислює значення коефіцієнту тепловіддачі по визначеному значенню опору. Застосування R-R – сіткового процесора дозволяє прискорити обробку результатів експериментальних досліджень.

Істотним є вибір розмірності розв'язуваної задачі. При рішенні двох – і особливо тривимірних задач виникають складності, пов'язані з великою кількістю вузлів сітки, що задіяні в обчислюваному процесі. При переході від двомірної до одновірної задачі кількість вузлів сітки зменшується на порядок.

Висока вартість проведення експериментальних досліджень, методом фізичного моделювання, на зменшених копіях технологічного обладнання (лабораторних прокатних станах) і неможливість забезпечити на них реальних температурно-швидкісних режимів прокатки потребують розробки методів математичного моделювання технологічного процесу.

Перехід до одновірної моделі при обробці результатів експериментальних досліджень (при рішенні зворотної задачі теплопровідності) може привести до помилки в результатах обчислень, яка перевищуватиме припустиму в інженерних обчисленнях похибку. Це пов'язано з тим, що одновірна модель не враховує впливу сусідніх вузлів на тепловий стан експериментального вимірювального блоку. Можливість використання одновірної або двовірної моделі можна оцінити шляхом розв'язання прямої задачі на стадії підготовки вихідних даних для проектування вимірювального блоку.

Вибір типу обчислювальних засобів для обробки результатів експериментальних досліджень.

У якості обчислювальних засобів можуть бути використані: аналогові, цифрові або гібридні обчислювальні машини, до складу яких входить сітковий процесор і цифрова обчислювальна машина

для розрахунку значень опорів у вузлах R–R сітки. Подібний підхід застосовується при польотних іспитах аерокосмічної техніки [4]. Це обумовлено тим, що при проектуванні і випробуваннях аерокосмічної техніки використовують найдосконаліші методи і засоби досліджень, які дозволяють суттєво зменшити кількість (і вартість) експериментів.

Оскільки для рішення зворотної задачі використовується метод підбора (проб), на цифровій обчислювальній машині необхідно виконати 10-15 розрахунків з метою мінімізації відхилення експериментальних і модельних температур. На сітковому процесорі аналогової обчислювальної машини цю операцію можна виконати практично миттєво. При обчисленні на цифровій обчислювальній машині оператор вручну задає граничні умови, ґрунтуючись на візуальному контролі різниці експериментальної і модельної температур.

Неявний кінцево-від'ємний метод передбачає виконання обчислень за допомогою R–R сіткового процесора.

Поле опорів R–R сітки розбивається на вузли. Граничні та початкові умови задають за допомогою блоків завдання граничних та початкових умов, відповідно. В процесі рішення, підбираючи опір на еталонному блоці, задля збігу модельної та експериментальної температури, отримуємо значення опору для блоку граничних умов.

При виконанні обчислень явним кінцево-від'ємним методом, з використанням персонального комп'ютера, потрібне програмне забезпечення, розроблене на основі математичної моделі явища. Підставляючи вручну (з клавіатури) коефіцієнти, відповідні до початкових та граничних умов наведеної задачі, у процесі рішення, отримуємо значення модельної температури. Ця температура порівнюється з температурою отриманою експериментальним шляхом.

У разі розбіжності модельної і експериментальної температури проводиться підбір коефіцієнта, що відповідає граничним умовам до тих пір, доки розбіжність між модельними і експериментальними температурами не буде мінімальною. Швидкість рішення залежить від кваліфікації оператора, як користувача ПЕОМ, та як спеціаліста у області досліджуваних процесів.

Швидкість рішення забезпечується:

- параметрами комп'ютера;
- мовою програмування, що застосовується;
- оптимальністю побудови програмного забезпечення;
- кваліфікацією оператора.

У випадку використання сіткового процесора процес мінімізації відхилення між експериментальною і модельною температурою залежить – тільки від психофізичних якостей оператора:

- швидкості зчитування інформації;
- швидкості її осмислювання;
- швидкості ухвалення рішення про зміну

вихідних даних;

- швидкості зміни вихідних даних.

Істотним є також частота оновлення результатів рішення на екрані монітору.

Якою би великою не була швидкість рішення задачі на комп'ютері, швидкість рішення задачі на сітковому процесорі вища, бо дорівнює швидкості світла [5]. Крім того, швидкість зміни вихідних даних у сітковому процесорі на порядок вища швидкості їхньої зміни у випадку ручного завдання з клавіатури.

За допомогою сучасних мов програмування можливо здійснити обчислення варіантів по критерію мінімізації відхилення між експериментальною і модельною температурою. Однак, створення програмного забезпечення для подібних розрахунків представляє окрему самостійну задачу і значно ускладнює процес обробки результатів експериментальних досліджень [6].

Таким чином, для обробки результатів експериментальних досліджень необхідно створити обчислювальний комплекс, який повинен складатися з сіткового процесора з R–R сіткою і персонального комп'ютера. Аналогово-обчислювальна машина (АОМ) включає блоки: завдання початкових і граничних умов, реєстрації і процесор з R–R сіткою. При рішенні зворотних задач доцільно використовувати сітковий процесор з R–R сіткою, з подальшим контролем отриманих значень шляхом рішення прямої задачі за допомогою цифрової обчислювальної машини. Для отримання достовірних результатів, дослідження слід виконати двома методами:

- неявним кінцево-від'ємним методом при виконанні обчислень за допомогою R–R сіткового процесора;

- явним кінцево-від'ємним методом при виконанні обчислень з використанням персонального комп'ютера.

Відомо, що фактичні значення теплофізичних характеристик матеріалу зразка, який використовується у дослідженнях, можуть суттєво відрізнитися від наведених у довідковій літературі.

Тому для визначення і урахування дійсних теплофізичних характеристик матеріалу, дослідження необхідно виконувати у такій послідовності:

- рішення внутрішньої (інверсної) зворотної задачі теплопровідності з метою уточнення значень теплофізичних характеристик матеріалу, з якого виготовлено вимірювальний блок;

- рішення зовнішньої зворотної задачі теплопровідності з метою визначення коефіцієнтів тепловіддачі від гарячої полоси до води, що його охолоджує в залежності від параметрів кінцевих пристроїв системи охолодження.

При цьому необхідно враховувати:

- тип пристрою по характеру подачі води (розпилена чи суцільна середа);
- кут нахилу вісі пристрою по відношенню до поверхні, що охолоджується;
- довжину ефективної зони дії струменю води;
- кількість води і тиск.

Обчислювальний комплекс для обробки результатів експериментальних досліджень

Для скорочення часу обробки результатів експериментальних досліджень і підвищення точності їх виконання створено аналогово-цифровий обчислювальний комплекс. Оскільки подібні комплекси мають спеціальне призначення їх практично нема у загальному користуванні. Тому науковцям необхідно самостійно проектувати і створювати подібні комплекси.

Враховуючи складність та особливості процесів, то досліджуються, R–R –сітковий процесор було доповнено спеціально розробленими вузлами, а саме: R–R – сітковим процесором для рішення двомірних задач з блоком розширення початкових і граничних умов. Внаслідок цього, з'явилась можливість вирішувати двомірні задачі теплопровідності. Загальний вигляд обчислювального комплексу приведено на рис. 1.

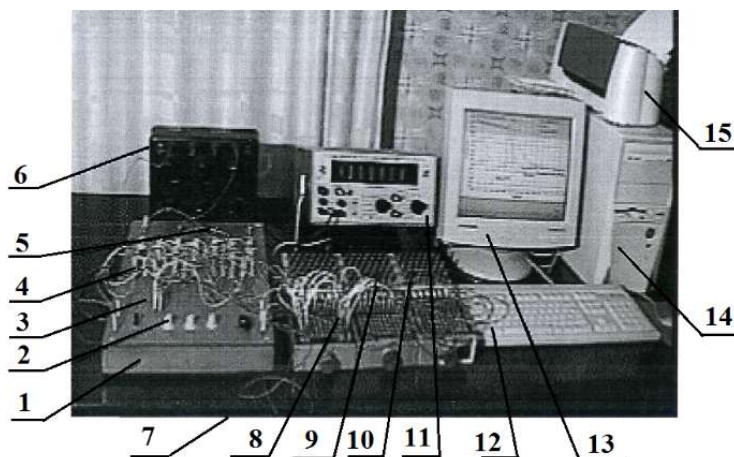


Рис. 1 – Загальний вигляд обчислювального комплексу

1 – блок стабілізатора напруги живлення; 2 – блок завдання граничних умов; 3 – блок завдання початкових умов; 4 – блок опорів; 5 – перемикачі часу рішення задачі; 6 – блок еталонних опорів; 7 – R–R – сітковий процесор; 8 – блок для розширення початкових і граничних умов; 9 – блок опорів для настройки часу рішення; 10 – блок опорів для моделювання двомірних задач; 11 – універсальний вольтметр; 12 – клавіатура; 13 – монітор; 14 – системний блок; 15 – пристрій для запису інформації на компакт-диски

В основному блоці АОМ 1 реконструйовано блок стабілізатора напруги живлення з урахуванням вимог часу – стабілізація при коливанні напруги в мережі від 140 до 280 вольт.

Блок 2 завдання граничних умов використовується для моделювання процесів нагріву і охолодження.

Блок 3 завдання початкових умов виконаний у вигляді розподільвача з двомастами опорами. Це дозволяє задавати початкові умови з точністю 0,5 %, що відповідає вимогам до проектування блоків завдання початкових умов обчислювальних машин [7].

Час процесу та теплофізичні характеристики матеріалу, при рішенні задач методом Лібманна (дискретний простір – дискретний час) враховуються за допомогою блоку опорів 4 [6, 7, 8].

Для зменшення кількості завдань початкових умов використано три сітки, до вузлових точок яких підключаються опори, що враховують час рішення і теплофізичні характеристики матеріалу (питому вагу і теплоємність).

Перемикачі часу рішення задачі 5 дозволяють вмикати одну з трьох сіток, щоб швидко змінювати час вирішення задачі, який становить для положення I – 0,125, для II – 0,5 від часу рішення обчисленого для III положення.

Блок 6 еталонних опорів дозволяє завдяки цифрам на лімбах швидко визначити значення опору, який входить до формули для обчислення коефіцієнту тепловіддачі.

R–R – сітковий процесор 7 створений додатково до основного блоку для рішення двомірних задач. Він має в своєму складі блок 8 для розширення початкових і граничних умов, а також блок опорів для настройки часу рішення 9 .

Основою R–R – сіткового процесора є блок опорів 10 для моделювання двомірних задач, а також рішення задач теплообміну між декількома об'єктами.

Універсальний вольтметр 11 використовується для настройки опорів між вузлами R–R – сіткового процесора та настройки опорів в блоці встановлення часу рішення. Реєстрація результатів відбувається в персональному комп'ютері який зв'язаний з R–R сітковим процесором за допомогою аналогово-цифрового перетворювача.

Клавіатура 12 використовується для завдання вихідних даних при рішенні прямих і зворотних задач, а також керування цифровою частиною обчислювального комплексу.

Монітор 13 використовується при створенні програмного забезпечення, візуалізації рішення прямих і зворотних задач.

Системний блок 14 дозволяє вирішувати прямі задачі за допомогою цифрового процесора і має пристрій для запису інформації на компакт-диски 15.

При виконанні обчислень явним кінцево-від'ємним методом, з використанням персонального комп'ютера, потрібне програмне забезпечення, розроблене на основі математичної моделі явища. Підставляючи вручну (з клавіатури) коефіцієнти, відповідні до початкових та граничних умов наведеної задачі, у процесі рішення на ПЕОМ, отримуємо значення температури при заданих коефіцієнтах теплообміну. Ця температура (модельна) порівнюється з експериментальною. У разі розбіжності модельної і експериментальної температури проводимо підбір коефіцієнту теплообміну до тих пір, доки розбіжність між модельними і експериментальними температурами не буде мінімальною. Швидкість рішення залежить від кваліфікації оператора, як користувача ПЕОМ, і як спеціаліста у області досліджуваних процесів.

Для спрощення обробки результатів експериментальних досліджень створено обчислювальний комплекс.

Спочатку рішення виконується, практично за один прийом, на R–R сітковому процесорі. Встановлюється значення в вольтах (аналог експериментальної температури) на табло універсального вольтметра шляхом регулювання опору, що моделює значення коефіцієнту тепловіддачі. Значення коефіцієнту тепловіддачі обчислюється по визначеному значенню опору, що моделює коефіцієнт тепловіддачі.

Значення коефіцієнту тепловіддачі визначені з рішення на R–R – сітковому процесорі, неявним кінцево-від'ємним методом, підставляються для контрольного рішення прямої задачі на ПЕОМ явним кінцево-від'ємним методом. У разі збігу значень модельної температури з експериментальною – рішення визнається вірним і заноситься в базу даних. У разі, якщо похибка перевищує припустиму, рішення необхідно повторити.

Таким чином, завдяки створеному обчислювальному комплексу маємо змогу вирішити задачу двома методами: аналоговим (з використанням неявного кінцево-від'ємного методу) і чисельним (з використанням явного кінцево-від'ємного методу), що достатньо для отримання достовірних результатів.

Висновки

1. Встановлено, що для рішення зворотних задач теплопровідності найбільш придатним є екстремальний метод підбора (проб), який дозволяє використовувати сучасну обчислювальну техніку, за рахунок чого час і вартість рішення мінімальні, а точність – достатня для інженерних розрахунків.

2. Визначено склад обладнання і створено обчислювальний комплекс для обробки результатів експериментальних досліджень процесів нагріву полоси в печі, процесів теплообміну полоси і інструменту в зоні деформації при прокатці, а також процесу примусового охолодження полоси в технологічному циклі. В склад комплексу входять персональний комп'ютер та самостійно розроблений сітковий процесор, підсилувач аналогового сигналу, аналогово-цифровий перетворювач і пакет програм для забезпечення роботи комплексу.

Список літератури

1. Салтавец В.И., Николаенко В.Е. Методика решения обратной задачи теплопроводности / ВНИИС Госстроя СССР №3570-83 // Реф. журнал ВНИИС. Серия 01. – вып. 3 – 1983.
2. Спэрроу К. Характеристики полых стеклянных шариков микроскопических размеров, материала и непрозрачной добавки к другим теплоизоляциям // Теплопередача. – 1976. – №2. – С. 91–99.
3. Коздоба Л.А., Круковский П.Г. Методы решения обратных задач теплопереноса. – Киев: Наук. думка, 1982. – 360 с.
4. Натурный эксперимент: Информационное обеспечение экспериментальных исследований / А.Н. Солодихин, В.А. Солодовников и др.; под ред. Н.И. Баклашова. – М.: Радио и связь, 1982. – 304 с.
5. Кузьмин М.П. Электрическое моделирование нестационарных процессов теплообмена. – М.: Энергия, 1974. – 416 с., с ил.
6. Козлов Э.С., Сергеев Н.П., Николаев Н.С. Автоматизация процессов решения краевых задач с помощью АЦВМ. – М.: Энергия, 1974. – 111 с.
7. Liebmman G.A. A new electrical analog method for the solution of transient heat-conduction problems // Transaction of the ASME. – 1956. – v.78 №3. – P. 655–665.
8. Бутковский А.Г. Методы управления системами с распределенными параметрами. – М.: Наука, 1975. – 568 с.

References (transliterated)

1. Saltavec V.I., Nikolaenko V.E. Metodika resheniya obratnoj zadachi teploprovodnosti / VNIIS Gosstroya SSSR No 3570-83 // Ref. zhurnal VNIIS. Seriya 01. – 1983. – vyp. 3
2. Sperrou K. Kharakteristiki polykh steklyannykh sharikov mikroskopicheskikh razmerov, materiala i neprozrachnoj dobavki k drugim teploizolyaciyam // Teploperedacha. – 1976. – No 2. – P. 91–99.
3. Kozdoba L.A., Krukovskij P.G. Metody resheniya obratnykh zadach teploperenosa. – Kiev: Nauk. dumka, 1982. – 360 p.
4. Naturnyj eksperiment: Informacionnoe obespechenie eksperimentalnykh issledovanij / A.N. Solodikhin, V.A. Solodovnikov i dr.; pod red. N.I. Baklashova. – Moscow: Radio i svyaz', 1982. – 304 p.
5. Kuz'min M.P. Elektricheskoe modelirovanie nestacionarnykh processov teploobmena. – Moscow: Energiya, 1974. – 416 p., s il.
6. Kozlov E'.S., Sergeev N.P., Nikolaev N.S. Avtomatizaciya processov resheniya kraevykh zadach s pomoshh'yu ACVM. – Moscow: Energiya, 1974. – 111 p.
7. Liebmman G.A. A new electrical analog method for the solution of transient heat-conduction problems // Transaction of the ASME. – 1956. – v.78 No3. – P. 655–665.
8. Butkovskij A.G. Metody upravleniya sistemami s raspredelyonnymi parametrami. – Moscow: Nauka, 1975. – 568 p.

Надійшла (received) 20.09.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Тришевський Олег Ігорович (Тришевский Олег Игоревич, Trishevskiy Oleg Igorevich) – доктор технічних наук, професор, зав. кафедри «Технологія матеріалів», Національний технічний університет сільського господарства ім. П.Василенко, м. Харків, Україна, e-mail: 3shev@ukr.net

Салтавець Микола Вільямович (Салтавец Николай Вильямович, Saltavets Nikolay Viljamovich) – інженер кафедри «Технологія матеріалів», Національний технічний університет сільського господарства ім. П.Василенко, м. Харків, Україна, e-mail: techmat@ukr.net

Воробйов Дмитро Сергійович (Воробьев Дмитрий Сергеевич) – студент, Національний технічний університет сільського господарства ім. П.Василенко, м. Харків, Україна, e-mail: techmat@ukr.net

УДК 539.3

В. В. ЧИГИРИНСКИЙ, В. А. БРЕНЕР, Е. Г. НАУМЕНКО**АНАЛИЗ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ЗАДАЧИ МЕХАНИКИ СПЛОШНОЙ СРЕДЫ**

Статья посвящена выявлению обобщенных подходов для формулировки граничных условий применительно к задачам механики сплошной среды. На базе уравнений равновесия элементарного тетраэдра рассмотрены выражения для определения контактных напряжений. Для решения задач теории пластичности удобно использовать контактные касательные напряжения наклонной площадки в виде граничных условий. Показаны возможности их применения для объемных задач механики сплошной среды в аналитическом виде. Удалось перегруппировать достаточно громоздкие выражения таким образом, чтобы обозначились суммы и разности квадратов. Получены аналитические выражения для определения контактных касательных напряжений объемной задачи. При подстановке соответствующих значений углов выражения приводятся к известным формулам. Это позволило получить некоторые обобщения, обозначить возможность непосредственного анализа, и упростить нахождение решений дифференциальных уравнений в частных производных для пространственных задач механики сплошной среды.

Ключевые слова: граничные условия, пространственная задача, обобщенные подходы, тензор напряжений, механика сплошной среды.

В. В. ЧИГИРИНСЬКИЙ, В. О. БРЕНЕР, О. Г. НАУМЕНКО**АНАЛІЗ ГРАНИЧНИХ УМОВ ПРОСТОРОВОЇ ЗАДАЧИ МЕХАНИКИ СУЦІЛЬНОГО СЕРЕДОВИЩА**

Стаття присвячена виявленню узагальнених підходів для формулювання граничних умов стосовно задач механіки суцільного середовища. На базі рівнянь рівноваги елементарного тетраедра розглянуті вирази для визначення контактних напружень. Для вирішення задач теорії пластичності зручно використовувати контактні дотичні напруження похилої площадки у вигляді граничних умов. Наведені можливості їх застосування для об'ємних задач механіки суцільного середовища в аналітичному виді. Вдалося перегрупувати досить громіздкі вирази, отримав суми та різниці квадратів. Отримано аналітичні вирази для визначення контактних дотичних напружень об'ємної задачі. При підстановці відповідних значень кутів вирази приводяться до відомим формулам механіки. Це дозволило отримати деякі узагальнення, встановити можливість безпосереднього аналізу та спростити знаходження рішень диференціальних рівнянь в часткових похідних для просторових задач механіки суцільного середовища.

Ключові слова: граничні умови, просторова задача, узагальнені підходи, тензор напружень, механіка суцільного середовища.

V. V. CHIGIRINSKY, V. A. BRENER, E. G. NAUMENKO**THE ANALYSIS OF BOUNDARY CONDITIONS IN SPATIAL PROBLEM OF CONTINUUM MECHANICS**

The article is devoted to the identification of generalized approaches for the formulation of boundary conditions related to problems of continuum mechanics. Based on equilibrium equations of elementary tetrahedron the expressions for determination of contact shear stresses are considered. To solve a problem of the theory of plasticity it is preferable to use the contact shear stresses on oblique planes as boundary conditions. Possibilities of their application in spatial problem of continuum mechanics in an analytical form are given. It was succeeded to regroup cluttered appearance so that sums and differences of squares were designated. Analytical expressions for determining the contact shear stresses of volumetric problem are given. It is shown that substitution of the corresponding values of the angles of expression is reduced to well-known formulas. It allowed to get some generalizations, to emphasise a possibility of direct analysis, and to simplify solving the partial differential equations in the spatial problems of continuum mechanics.

Key words: boundary conditions, spatial problem, generalized approaches, stress tensor, continuum mechanics.

Введение. При решении задач теории пластичности, упругости, динамических задач необходимо знать краевые условия, более конкретно граничные условия, которые для многих процессов обработки металлов давлением, теории упругости являются неизвестными зависимостями. Выявление обобщающих закономерностей, позволяющих упростить решение системы дифференциальных уравнений, не в ущерб качеству полученного результата, представляется одной из первоочередных задач механики сплошной среды. Известно, что граничные условия задаются в напряжениях, перемещениях, также имеют место комбинированные граничные условия, [1]...[4]. В данном случае анализ граничных условий рассматривается в напряжениях. При этом используются известные из литературы зависимости и подходы, сформулированные классиками теории

пластичности и упругости. Граничные условия, на базе уравнений равновесия, представляют собой аналитические выражения, связывающие компоненты тензора напряжений с контактными силовыми характеристиками упругого или пластического деформирования.

Цель и постановка задачи. Целью работы является выявление обобщенных подходов для формулировки граничных условий применительно к задачам механики сплошной среды. Определение математических зависимостей, связывающих компоненты тензора напряжений с контактными силовыми характеристиками для плоской и пространственной задач механики деформированного твердого тела.

Описание полученных результатов. Рассматривается наклонная плоскость, к которой приложены внешние силы и взаимно

перпендикулярные площадки, где действуют внутренние силы, определяемые компонентами тензора напряжений. При выводе будем придерживаться подходов изложенных в работах [5],[6]. Записывая уравнения равновесия для тетраэдра, имеем

$$\begin{aligned}\sigma_x \cdot \cos(n,x) + \tau_{xy} \cdot \cos(n,y) + \tau_{xz} \cdot \cos(n,z) &= p_{nx}; \\ \tau_{yx} \cdot \cos(n,x) + \sigma_y \cdot \cos(n,y) + \tau_{yz} \cdot \cos(n,z) &= p_{ny}; \\ \tau_{zx} \cdot \cos(n,x) + \tau_{zy} \cdot \cos(n,y) + \sigma_z \cdot \cos(n,z) &= p_{nz},\end{aligned}$$

где σ, τ – нормальные и касательные напряжения, приложенные к взаимно перпендикулярным площадкам;

P_{nx}, P_{ny}, P_{nz} – составляющие полного напряжения, действующего в наклонной площадке по координатным осям.

$$\text{При этом } p = \sqrt{p_{nx}^2 + p_{ny}^2 + p_{nz}^2};$$

$$\begin{aligned}\sigma_n &= p_{nx} \cdot \cos(n,x) + p_{ny} \cdot \cos(n,y) + p_{nz} \cdot \cos(n,z); \\ \tau_n^2 &= p^2 - \sigma_n^2,\end{aligned}$$

где p, σ_n, τ_n – полное, нормальное и касательное напряжения наклонной площадки.

Введем обозначения для направляющих косинусов

$$a_x = \cos(n,x); a_y = \cos(n,y); a_z = \cos(n,z);$$

при этом

$$a_x^2 + a_y^2 + a_z^2 = 1.$$

С учетом обозначений можно записать

$$\begin{aligned}\sigma_x \cdot a_x + \tau_{xy} \cdot a_y + \tau_{xz} \cdot a_z &= p_{nx}; \\ \tau_{yx} \cdot a_x + \sigma_y \cdot a_y + \tau_{yz} \cdot a_z &= p_{ny}; \\ \tau_{zx} \cdot a_x + \tau_{zy} \cdot a_y + \sigma_z \cdot a_z &= p_{nz};\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\sigma_n &= p_{nx} \cdot a_x + p_{ny} \cdot a_y + p_{nz} \cdot a_z = \\ &= \sigma_x \cdot a_x^2 + \tau_{xy} \cdot a_y \cdot a_x + \tau_{xz} \cdot a_z \cdot a_x + \tau_{yx} \cdot a_x \cdot a_y + \sigma_y \cdot a_y^2 + \\ &+ \tau_{yz} \cdot a_z \cdot a_y + \tau_{zx} \cdot a_x \cdot a_z + \tau_{zy} \cdot a_y \cdot a_z + \sigma_z \cdot a_z^2 = \\ &= \sigma_x \cdot a_x^2 + (\tau_{xy} + \tau_{yx}) \cdot a_y \cdot a_x + (\tau_{xz} + \tau_{zx}) \cdot a_z \cdot a_x + \\ &+ (\tau_{yz} + \tau_{zy}) \cdot a_z \cdot a_y + \sigma_y \cdot a_y^2 + \sigma_z \cdot a_z^2.\end{aligned}$$

Квадраты составляющих и нормального напряжения

$$\begin{aligned}p_{nx}^2 &= [(\sigma_x \cdot a_x)^2 + (\tau_{xy} \cdot a_y)^2 + (\tau_{xz} \cdot a_z)^2 + 2 \cdot (\sigma_x \cdot a_x) \cdot (\tau_{xy} \cdot a_y) + 2 \cdot (\sigma_x \cdot a_x) \cdot (\tau_{xz} \cdot a_z) + 2 \cdot (\tau_{xz} \cdot a_z) \cdot (\tau_{xy} \cdot a_y)] \\ p_{ny}^2 &= [(\tau_{yx} \cdot a_x)^2 + (\sigma_y \cdot a_y)^2 + (\tau_{yz} \cdot a_z)^2 + 2 \cdot (\tau_{yx} \cdot a_x) \cdot (\sigma_y \cdot a_y) + 2 \cdot (\tau_{yx} \cdot a_x) \cdot (\tau_{yz} \cdot a_z) + 2 \cdot (\tau_{yz} \cdot a_z) \cdot (\sigma_y \cdot a_y)] \\ p_{nz}^2 &= [(\tau_{zx} \cdot a_x)^2 + (\tau_{zy} \cdot a_y)^2 + (\sigma_z \cdot a_z)^2 + 2 \cdot (\tau_{zx} \cdot a_x) \cdot (\tau_{zy} \cdot a_y) + 2 \cdot (\tau_{zx} \cdot a_x) \cdot (\sigma_z \cdot a_z) + 2 \cdot (\sigma_z \cdot a_z) \cdot (\tau_{zy} \cdot a_y)] \\ \sigma_n^2 &= [\sigma_x \cdot a_x^2]^2 + [(\tau_{xy} + \tau_{yx}) \cdot a_y \cdot a_x]^2 + [(\tau_{xz} + \tau_{zx}) \cdot a_z \cdot a_x]^2 + \\ &+ [(\tau_{yz} + \tau_{zy}) \cdot a_z \cdot a_y]^2 + [\sigma_y \cdot a_y^2]^2 + [\sigma_z \cdot a_z^2]^2 + 2 \cdot [\sigma_x \cdot a_x^2] \cdot [\sigma_z \cdot a_z^2] + \\ &+ 2 \cdot [\sigma_x \cdot a_x^2] \cdot [(\tau_{xy} + \tau_{yx}) \cdot a_y \cdot a_x] + 2 \cdot [\sigma_x \cdot a_x^2] \cdot [(\tau_{xz} + \tau_{zx}) \cdot a_z \cdot a_x] + \\ &+ 2 \cdot [\sigma_x \cdot a_x^2] \cdot [(\tau_{yz} + \tau_{zy}) \cdot a_z \cdot a_y] + 2 \cdot [\sigma_y \cdot a_y^2] \cdot [(\tau_{xy} + \tau_{yx}) \cdot a_y \cdot a_x] + \\ &+ 2 \cdot [\sigma_y \cdot a_y^2] \cdot [(\tau_{xz} + \tau_{zx}) \cdot a_z \cdot a_x] + 2 \cdot [\sigma_y \cdot a_y^2] \cdot [(\tau_{yz} + \tau_{zy}) \cdot a_z \cdot a_y] + \\ &+ 2 \cdot [\sigma_z \cdot a_z^2] \cdot [(\tau_{xy} + \tau_{yx}) \cdot a_y \cdot a_x] + 2 \cdot [\sigma_z \cdot a_z^2] \cdot [(\tau_{xz} + \tau_{zx}) \cdot a_z \cdot a_x] + \\ &+ 2 \cdot [\sigma_z \cdot a_z^2] \cdot [(\tau_{yz} + \tau_{zy}) \cdot a_z \cdot a_y] + 2 \cdot [(\tau_{xy} + \tau_{yx}) \cdot a_y \cdot a_x] + \\ &+ [(\tau_{xz} + \tau_{zx}) \cdot a_z \cdot a_x] + 2 \cdot [(\tau_{xy} + \tau_{yx}) \cdot a_y \cdot a_x] \cdot [(\tau_{yz} + \tau_{zy}) \cdot a_z \cdot a_y] + \\ &+ 2 \cdot [(\tau_{xz} + \tau_{zx}) \cdot a_z \cdot a_x] \cdot [(\tau_{yz} + \tau_{zy}) \cdot a_z \cdot a_y]\end{aligned}$$

Контактное касательное напряжение во второй фигурной скобке, квадраты касательных напряжений в третьей фигурной скобке. После произведения нормальных и касательных напряжений

$$\begin{aligned}\tau_n^2 = p^2 - \sigma_n^2 &= \left\{ (\sigma_x \cdot a_x)^2 - [\sigma_x \cdot a_x^2]^2 + (\sigma_y \cdot a_y)^2 - [\sigma_y \cdot a_y^2]^2 + (\sigma_z \cdot a_z)^2 - [\sigma_z \cdot a_z^2]^2 - \right. \\ &- 2(\sigma_x \cdot a_x) \cdot (\sigma_y \cdot a_y) - 2(\sigma_x \cdot a_x) \cdot (\sigma_z \cdot a_z) - 2(\sigma_z \cdot a_z) \cdot (\sigma_y \cdot a_y) \left. \right\} + \\ &+ \left\{ 2 \cdot (\sigma_x \cdot a_x) \cdot (\tau_{xy} \cdot a_y) + 2 \cdot (\sigma_x \cdot a_x) \cdot (\tau_{xz} \cdot a_z) + 2 \cdot (\sigma_y \cdot a_y) \cdot (\tau_{yx} \cdot a_x) + \right. \\ &+ 2 \cdot (\sigma_z \cdot a_z) \cdot (\tau_{zx} \cdot a_x) + 2 \cdot (\sigma_z \cdot a_z) \cdot (\tau_{zy} \cdot a_y) + \\ &+ 2 \cdot (\sigma_y \cdot a_y) \cdot (\tau_{yz} \cdot a_z) - 2(\sigma_x \cdot a_x^2) \cdot [(\tau_{xy} + \tau_{yx}) \cdot a_y \cdot a_x] - 2(\sigma_x \cdot a_x^2) \cdot \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \cdot [(\tau_{xz} + \tau_{zx}) \cdot a_z \cdot a_x] - 2(\sigma_x \cdot a_x^2) \cdot [(\tau_{yz} + \tau_{zy}) \cdot a_z \cdot a_y] - \\
& 2(\sigma_y \cdot a_y^2) \cdot [(\tau_{xy} + \tau_{yx}) \cdot a_y \cdot a_x] - 2(\sigma_y \cdot a_y^2) \cdot [(\tau_{xz} + \tau_{zx}) \cdot a_z \cdot a_x] - \\
& - 2(\sigma_y \cdot a_y^2) \cdot [(\tau_{yz} + \tau_{zy}) \cdot a_z \cdot a_y] - 2(\sigma_z \cdot a_z^2) \cdot [(\tau_{xy} + \tau_{yx}) \cdot a_y \cdot a_x] - \\
& - 2(\sigma_z \cdot a_z^2) \cdot [(\tau_{xz} + \tau_{zx}) \cdot a_z \cdot a_x] - 2(\sigma_z \cdot a_z^2) \cdot [(\tau_{yz} + \tau_{zy}) \cdot a_z \cdot a_y] + \\
& + \{(\tau_{yx} \cdot a_x)^2 + (\tau_{zx} \cdot a_x)^2 + (\tau_{yz} \cdot a_z)^2 + (\tau_{zy} \cdot a_y)^2 + (\tau_{xz} \cdot a_z)^2 + (\tau_{xy} \cdot a_y)^2 + \\
& + 2(\tau_{xy} \cdot a_y) \cdot (\tau_{xz} \cdot a_z) + 2(\tau_{yx} \cdot a_x) \cdot (\tau_{yz} \cdot a_z) + 2(\tau_{zx} \cdot a_x) \cdot (\tau_{zy} \cdot a_y) - \\
& - 2[(\tau_{xy} + \tau_{yx}) \cdot a_y \cdot a_x] \cdot [(\tau_{xz} + \tau_{zx}) \cdot a_z \cdot a_x] - 2[(\tau_{xy} + \tau_{yx}) \cdot a_y \cdot a_x] \cdot \\
& \cdot [(\tau_{yz} + \tau_{zy}) \cdot a_z \cdot a_y] - 2[(\tau_{xz} + \tau_{zx}) \cdot a_z \cdot a_x] \cdot [(\tau_{yz} + \tau_{zy}) \cdot a_z \cdot a_y] - \\
& - [(\tau_{yx} + \tau_{yx}) \cdot a_y \cdot a_x]^2 - [(\tau_{zx} + \tau_{zx}) \cdot a_z \cdot a_x]^2 - [(\tau_{zy} + \tau_{zy}) \cdot a_y \cdot a_z]^2 \};
\end{aligned}$$

Рассмотрим каждую фигурную скобку отдельно. упорядоченность в выражениях. Первая фигурная
Группируя и анализируя можно показать, что в каждой скобка имеет вид
фигурной скобке просматривается некоторая

$$\{1\} = \{a_x^2 \cdot a_y^2 (\sigma_x - \sigma_y)^2 + a_x^2 \cdot a_z^2 (\sigma_x - \sigma_z)^2 + a_y^2 \cdot a_z^2 (\sigma_y - \sigma_z)^2\};$$

вторая

$$\begin{aligned}
\{2\} = & \{2a_x a_y \langle (\sigma_x - \sigma_y) \cdot (\tau_{xy} a_y^2 - \tau_{yx} a_x^2) + a_z^2 [(\sigma_x - \sigma_z) \tau_{xy} + (\sigma_y - \sigma_z) \tau_{yx}] \rangle + \\
& + 2a_x a_z \langle (\sigma_x - \sigma_z) \cdot (\tau_{xz} a_z^2 - \tau_{zx} a_x^2) + a_y^2 [(\sigma_x - \sigma_y) \tau_{xz} + (\sigma_z - \sigma_y) \tau_{yx}] \rangle + \\
& + 2a_y a_z \langle (\sigma_y - \sigma_z) \cdot (\tau_{yz} a_z^2 - \tau_{zy} a_y^2) + a_x^2 [(\sigma_y - \sigma_x) \tau_{yz} + (\sigma_z - \sigma_x) \tau_{yx}] \rangle \};
\end{aligned}$$

третья

$$\begin{aligned}
\{3\} = & \{a_y^2 \cdot [\tau_{xy}^2 - (\tau_{xy} + \tau_{yx})^2] \cdot a_x^2 + a_z^2 \cdot [\tau_{xz}^2 - (\tau_{xz} + \tau_{zx})^2] \cdot a_x^2 + a_z^2 \cdot [\tau_{yz}^2 - (\tau_{yz} + \tau_{zy})^2] \cdot a_y^2 + \tau_{yx}^2 a_x^2 + \tau_{zx}^2 a_x^2 + \tau_{zy}^2 a_y^2 + \\
& + 2a_y a_z [\tau_{xy} \cdot \tau_{xz} - (\tau_{xy} + \tau_{yx}) \cdot (\tau_{xz} + \tau_{zx})] a_x^2 + 2a_x a_z [\tau_{yx} \cdot \tau_{yz} - (\tau_{xy} + \tau_{yx}) \cdot (\tau_{zy} + \tau_{yz})] a_y^2 + \\
& + 2a_x a_y [\tau_{zx} \cdot \tau_{zy} - (\tau_{xz} + \tau_{zx}) \cdot (\tau_{zy} + \tau_{yz})] a_z^2 \};
\end{aligned}$$

Перегруппируя выражения еще раз, получим

$$\begin{aligned}
\tau_n^2 = p^2 - \sigma_n^2 = & \{a_x^2 \cdot a_y^2 (\sigma_x - \sigma_y)^2 + a_x^2 \cdot a_z^2 (\sigma_x - \sigma_z)^2 + a_y^2 \cdot a_z^2 (\sigma_y - \sigma_z)^2\} + \\
& + \{2a_x a_y \langle (\sigma_x - \sigma_y) \cdot (\tau_{xy} a_y^2 - \tau_{yx} a_x^2) + a_z^2 [(\sigma_x - \sigma_z) \tau_{xy} + (\sigma_y - \sigma_z) \tau_{yx}] \rangle + \\
& + 2a_x a_z \langle (\sigma_x - \sigma_z) \cdot (\tau_{xz} a_z^2 - \tau_{zx} a_x^2) + a_y^2 [(\sigma_x - \sigma_y) \tau_{xz} + (\sigma_z - \sigma_y) \tau_{yx}] \rangle + \\
& + 2a_y a_z \langle (\sigma_y - \sigma_z) \cdot (\tau_{yz} a_z^2 - \tau_{zy} a_y^2) + a_x^2 [(\sigma_y - \sigma_x) \tau_{yz} + (\sigma_z - \sigma_x) \tau_{yx}] \rangle \} + \\
& + \{[(\tau_{xy} a_y^2 - \tau_{xz} a_x^2) + a_z (\tau_{xz} a_y - \tau_{yz} a_x)]^2 + [(\tau_{yz} a_z^2 - \tau_{zy} a_y^2) + \\
& + a_x (\tau_{yx} a_y - \tau_{zx} a_x)]^2 + [(\tau_{xz} a_z^2 - \tau_{zx} a_x^2) + a_y (\tau_{xy} a_z - \tau_{zy} a_x)]^2\} \quad (1)
\end{aligned}$$

Достаточно громоздкое выражение (1), после приведения принимает приемлемый для анализа вид

$$\begin{aligned}
\tau_n^2 = p^2 - \sigma_n^2 = & \{a_x \cdot a_y (\sigma_x - \sigma_y) + [(\tau_{xy} \cdot a_y^2 - \tau_{yx} \cdot a_x^2) + a_z \cdot (\tau_{xz} a_y - \tau_{yz} a_x)]\}^2 + \\
& + \{a_x \cdot a_z (\sigma_x - \sigma_z) + [(\tau_{xz} \cdot a_z^2 - \tau_{zx} \cdot a_x^2) + a_y \cdot (\tau_{xy} a_z - \tau_{zy} a_x)]\}^2 + \\
& + \{a_y \cdot a_z (\sigma_y - \sigma_z) + [(\tau_{yz} \cdot a_z^2 - \tau_{zy} \cdot a_y^2) + a_x \cdot (\tau_{yx} a_z - \tau_{zx} a_y)]\}^2. \quad (2)
\end{aligned}$$

Выражение (2), для контактного касательного тогда составляющие контактных касательных
напряжения можно представить в виде суммы напряжений
квадратов

$$\tau_n^2 = \tau_{nxy}^2 + \tau_{nyz}^2 + \tau_{nzx}^2,$$

$$\begin{aligned} \tau_{nxy} &= \pm \{a_x \cdot a_y (\sigma_x - \sigma_y) + [(\tau_{xy} \cdot a_y^2 - \tau_{yx} \cdot a_x^2) + a_z \cdot (\tau_{xz} a_y - \tau_{yz} a_x)]\}, \\ \tau_{nzx} &= \pm \{a_x \cdot a_z (\sigma_x - \sigma_z) + [(\tau_{xz} \cdot a_z^2 - \tau_{zx} \cdot a_x^2) + a_y \cdot (\tau_{xy} a_z - \tau_{zy} a_x)]\}, \\ \tau_{nyz} &= \pm \{a_y \cdot a_z (\sigma_y - \sigma_z) + [(\tau_{yz} \cdot a_z^2 - \tau_{zy} \cdot a_y^2) + a_x \cdot (\tau_{yx} a_z - \tau_{zx} a_y)]\}. \end{aligned} \quad (3)$$

Из полученных значений (3) видно, что кроме напряжений соответствующих плоскостей присутствуют касательные напряжения смежных граней. Следует обратить внимание на различие касательных напряжений с одинаковыми нижними индексами, но с разной последовательностью

подстановки. Если в этом есть необходимость, то указанные касательные напряжения можно прировнять друг другу, например $\tau_{xy} = \tau_{yx}$; $\tau_{yz} = \tau_{zy}$; $\tau_{zx} = \tau_{xz}$, тогда

$$\begin{aligned} \tau_{nxy} &= \pm \{a_x \cdot a_y (\sigma_x - \sigma_y) + [\tau_{xy} \cdot (a_y^2 - a_x^2) + a_z \cdot (\tau_{xz} a_y - \tau_{yz} a_x)]\}, \\ \tau_{nzx} &= \pm \{a_x \cdot a_z (\sigma_x - \sigma_z) + [\tau_{zx} \cdot (a_z^2 - a_x^2) + a_y \cdot (\tau_{xy} a_z - \tau_{zy} a_x)]\}, \\ \tau_{nyz} &= \pm \{a_y \cdot a_z (\sigma_y - \sigma_z) + [\tau_{yz} \cdot (a_z^2 - a_y^2) + a_x \cdot (\tau_{yx} a_z - \tau_{zx} a_y)]\}. \end{aligned} \quad (4)$$

Если задача решается в одной плоскости, тогда выражения (3), (4) упрощаются и принимают вид (4), (5)

$$\begin{aligned} \tau_{nxy} &= \pm \{a_x \cdot a_y (\sigma_x - \sigma_y) + [\tau_{xy} \cdot (a_y^2 - a_x^2)]\}, \\ \tau_{nzx} &= \pm \{a_x \cdot a_z (\sigma_x - \sigma_z) + [\tau_{zx} \cdot (a_z^2 - a_x^2)]\}, \\ \tau_{nyz} &= \pm \{a_y \cdot a_z (\sigma_y - \sigma_z) + [\tau_{yz} \cdot (a_z^2 - a_y^2)]\}. \end{aligned} \quad (5)$$

Для примера в выражениях рассмотрим плоскость xu . Имеем

$$a_x = (n, x), a_y = \cos(n, y) = \sin(n, x).$$

Подставляя, получим

$$a_y^2 - a_x^2 = \sin^2(n, x) - \cos^2(n, x) = -\cos 2(n, x);$$

$$a_x \cdot a_y = \frac{\sin 2(n, x)}{2}.$$

Используя показанные соотношения, имеем

$$\tau_n = \pm \left\{ \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cdot \sin 2(n, x) - \tau_{xy} \cdot \cos 2(n, x) \right\}.$$

Это случай плоской задачи. При подстановке соответствующих значений углов последние выражения приводятся к известным формулам. Их можно применять при решении плоских задач механики сплошной среды, как граничные условия в напряжениях. Если площадки главные, тогда напряжение, (2), на наклонной площадке имеет вид

$$\tau_n^2 = \{a_1 \cdot a_2 (\sigma_1 - \sigma_2)\}^2 + \{a_1 \cdot a_3 (\sigma_1 - \sigma_3)\}^2 + \{a_2 \cdot a_3 (\sigma_2 - \sigma_3)\}^2.$$

Используя последнее выражение можно найти напряжения на диагональной площадке после задания ее координат, к примеру

$$a_3 = 0; a_1 = a_2 = \frac{1}{\sqrt{2}}; \tau_{12} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}, \text{ и т.д.}$$

Октаэдрическое касательное напряжение определяется, если задать значения параметров, показывающих ее положение в пространстве, действительно

$$a_3 = a_1 = a_2 = a = \frac{1}{\sqrt{3}}; \text{ тогда}$$

$$\tau_{окт} = \frac{1}{3} \sqrt{\{(\sigma_1 - \sigma_2)\}^2 + \{(\sigma_1 - \sigma_3)\}^2 + \{(\sigma_2 - \sigma_3)\}^2}.$$

С целью конкретизации выражений (3),(4) необходимо выразить направляющие косинусы и разности их квадратов, через одинаковые аргументы тригонометрических функций. Следует установить аналитическую связь между направляющими косинусами и вводимыми в рассмотрение дополнительными углами. На рис. 1 представлено разложение радиус вектора на составляющие по координатным осям, обозначены направляющие косинусы и дополнительные углы.

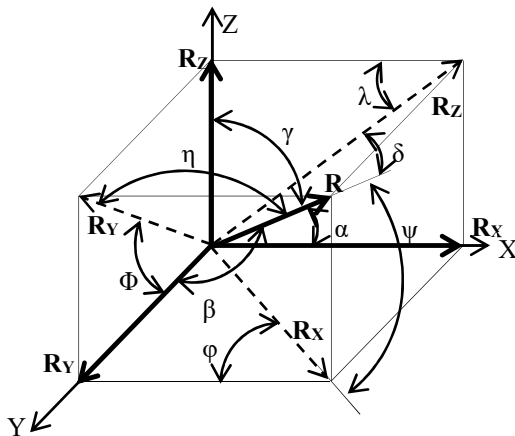


Рис.1 – Схема расположения углов при определении направляющих косинусов. Из построения определяются проекции вектора, с использованием направляющих косинусов, т.е.

$$R_x = R \cdot \cos \alpha = R \cdot a_x; \quad R_y = R \cdot \cos \beta = R \cdot a_y; \\ R_z = R \cdot \cos \gamma = R \cdot a_z.$$

При этом

$$R_{xy} = R \cdot \cos \psi; \quad R_{yz} = R \cdot \cos \eta; \quad R_{zx} = R \cdot \cos \delta,$$

где R_{xy} , R_{yz} , R_{zx} – проекции вектора на плоскости xy , yz , zx ;

ψ , η , δ – углы между вектором и его проекциями на соответствующие плоскости.

Рассмотрим плоскость xy . Определяем проекции вектора на оси X и Y в пределах своей плоскости, т.е.

$$R_x = R_{xy} \cdot \cos \phi; \quad \text{или} \quad R_x = R \cdot \cos \psi \cdot \cos \phi,$$

тогда

$$R_x = R \cdot \cos \alpha = R \cdot \cos \psi \cdot \cos \phi; \\ a_x = \cos \alpha = \cos \psi \cdot \cos \phi. \quad (6)$$

$$R_y = R_{xy} \cdot \sin \phi; \quad \text{или} \quad R_y = R \cdot \cos \psi \cdot \sin \phi;$$

тогда

$$R_y = R \cdot \cos \beta = R \cdot \cos \psi \cdot \sin \phi; \\ a_y = \cos \beta = \cos \psi \cdot \sin \phi. \quad (7)$$

Разность квадратов направляющих косинусов для первой круглой скобки в выражении для контактного касательного напряжения, с учетом (6), (7)

$$a_y^2 - a_x^2 = \cos^2 \beta - \cos^2 \alpha = (\cos \psi \sin \phi)^2 - (\cos \psi \cos \phi)^2 = \\ = -\cos^2 \psi \cos 2\phi.$$

Произведение направляющих косинусов

$$a_x \cdot a_y = (\cos \alpha) \cdot (\cos \beta) = (\cos \psi \cdot \cos \phi) \cdot (\cos \psi \cdot \sin \phi) = \\ = \cos^2 \psi \cdot \frac{\sin 2\phi}{2}.$$

Рассмотрим плоскость yz .

Определяем проекции вектора на оси Y и Z в пределах своей плоскости, т.е.

$$R_y = R_{yz} \cdot \cos \phi; \quad R_z = R \cdot \cos \eta;$$

или

$$R_y = R \cdot \cos \eta \cdot \cos \phi; \\ R_z = R \cdot \cos \beta = R \cdot \cos \eta \cdot \cos \phi; \\ a_y = \cos \beta = \cos \eta \cdot \cos \phi. \quad (8)$$

$$R_z = R_{yz} \cdot \sin \phi; \quad \text{или} \quad R_z = R \cdot \cos \eta \cdot \sin \phi;$$

тогда

$$R_z = R \cdot \cos \gamma = R \cdot \cos \eta \cdot \sin \phi; \\ a_z = \cos \gamma = \cos \eta \cdot \sin \phi. \quad (9)$$

Разность квадратов направляющих косинусов для второй круглой скобки в выражении для контактного касательного напряжения

$$a_z^2 - a_y^2 = \cos^2 \gamma - \cos^2 \beta = (\cos \eta \sin \phi)^2 - (\cos \eta \cos \phi)^2 = \\ = -\cos^2 \eta \cdot \cos 2\phi.$$

Произведение направляющих косинусов

$$a_z \cdot a_y = (\cos \gamma) \cdot (\cos \beta) = (\cos \eta \cdot \sin \phi) \cdot (\cos \eta \cdot \cos \phi) = \\ = \cos^2 \eta \cdot \frac{\sin 2\phi}{2}.$$

Рассмотрим плоскость zx .

Определяем проекции вектора на оси Z и X , в пределах своей плоскости, т.е.

$$R_z = R_{zx} \cdot \sin \lambda; \quad R_{zx} = R \cdot \cos \delta; \quad \text{или} \\ R_z = R \cdot \cos \delta \cdot \sin \lambda;$$

$$R_z = R \cdot \cos \gamma = R \cdot \cos \delta \cdot \sin \lambda; \\ a_z = \cos \gamma = \cos \delta \cdot \sin \lambda. \quad (10)$$

$$R_x = R_{zx} \cdot \cos \lambda; \quad \text{или} \quad R_x = R \cdot \cos \delta \cdot \cos \lambda; \quad \text{тогда}$$

$$R_x = R \cdot \cos \alpha = R \cdot \cos \delta \cdot \cos \lambda; \\ a_x = \cos \alpha = \cos \delta \cdot \cos \lambda. \quad (11)$$

Разность квадратов направляющих косинусов для третьей круглой скобки в выражении для контактного касательного напряжения

$$a_z^2 - a_x^2 = \cos^2 \gamma - \cos^2 \alpha = (\cos \delta \cdot \sin \lambda)^2 - (\cos \delta \cdot \cos \lambda)^2 = \\ = -\cos^2 \delta \cdot \cos 2\lambda.$$

Произведение направляющих косинусов

$$a_z \cdot a_x = (\cos \gamma) \cdot (\cos \alpha) = (\cos \delta \cdot \sin \lambda) \cdot (\cos \delta \cdot \cos \lambda) = \\ = \cos^2 \delta \cdot \frac{\sin 2\lambda}{2}.$$

$$\begin{aligned} \tau_{nxy} &= \pm \cos \psi \left\{ \frac{\sin 2\varphi}{2} (\sigma_x - \sigma_y) + \left[(\tau_{xy} \cdot \sin^2 \varphi - \tau_{yx} \cdot \cos^2 \varphi) + a_z \cdot (\tau_{xz} \sin \varphi - \tau_{yz} \cos \varphi) \right] \right\}; \\ \tau_{nzx} &= \pm \cos \delta \left\{ \frac{\sin 2\lambda}{2} (\sigma_x - \sigma_z) + \left[(\tau_{xz} \cdot \sin^2 \lambda - \tau_{zx} \cdot \cos^2 \lambda) + a_y \cdot (\tau_{xy} \cdot \sin \lambda - \tau_{zy} \cdot \cos \lambda) \right] \right\}; \\ \tau_{nyz} &= \pm \cos \eta \left\{ \frac{\sin 2\phi}{2} (\sigma_y - \sigma_z) + \left[(\tau_{yz} \cdot \sin^2 \phi - \tau_{zy} \cdot \cos^2 \phi) + a_x \cdot (\tau_{yx} \sin \phi - \tau_{zx} \cos \phi) \right] \right\}. \end{aligned} \quad (12)$$

В общей записи имеем

$$\begin{aligned} \tau_n^2 &= \cos^2 \psi \left\{ \frac{\sin 2\varphi}{2} (\sigma_x - \sigma_y) + \left[(\tau_{xy} \cdot \sin^2 \varphi - \tau_{yx} \cdot \cos^2 \varphi) + a_z \cdot (\tau_{xz} \sin \varphi - \tau_{yz} \cos \varphi) \right] \right\}^2 + \\ &+ \cos^2 \delta \left\{ \frac{\sin 2\lambda}{2} (\sigma_x - \sigma_z) + \left[(\tau_{xz} \cdot \sin^2 \lambda - \tau_{zx} \cdot \cos^2 \lambda) + a_y \cdot (\tau_{xy} \cdot \sin \lambda - \tau_{zy} \cdot \cos \lambda) \right] \right\}^2 + \\ &+ \cos^2 \eta \left\{ \frac{\sin 2\phi}{2} (\sigma_y - \sigma_z) + \left[(\tau_{yz} \cdot \sin^2 \phi - \tau_{zy} \cdot \cos^2 \phi) + a_x \cdot (\tau_{yx} \sin \phi - \tau_{zx} \cos \phi) \right] \right\}^2. \end{aligned} \quad (13)$$

Анализ формул (12), (13) показывает, что в граничных условиях по направлениям присутствуют все составляющие касательных напряжений, используемых в пространственном решении. Это достаточно принципиальное отличие от плоской задачи, когда касательные напряжения показаны в граничных условиях только для одной плоскости. Однако такая постановка задачи усложняет решение, так как в одно выражение входит несколько неизвестных переменных. Рационально приблизить составляющие касательных напряжений к плоской задаче.

Принимая условия в (3)

$$\begin{aligned} a_z \cdot (\tau_{xz} a_y - \tau_{yz} a_x) &\approx 0; \quad a_y \cdot (\tau_{xy} a_z - \tau_{zy} a_x) \approx 0; \\ a_x \cdot (\tau_{yx} a_z - \tau_{zx} a_y) &\approx 0, \end{aligned}$$

получаем упрощенные зависимости для граничных условий, представленных в напряжениях, т.е.

$$\begin{aligned} \tau_{nx} &= \pm \left\{ a_x \cdot a_y (\sigma_x - \sigma_y) + \left[(\tau_{xy} \cdot a_y^2 - \tau_{yx} \cdot a_x^2) \right] \right\}; \\ \tau_{ny} &= \pm \left\{ a_x \cdot a_z (\sigma_x - \sigma_z) + \left[(\tau_{xz} \cdot a_z^2 - \tau_{zx} \cdot a_x^2) \right] \right\}; \\ \tau_{nz} &= \pm \left\{ a_y \cdot a_z (\sigma_y - \sigma_z) + \left[(\tau_{yz} \cdot a_z^2 - \tau_{zy} \cdot a_y^2) \right] \right\}. \end{aligned} \quad (14)$$

Последняя запись для составляющих граничных условий (14), формально соответствует плоской задаче. В соответствии с последними выражениями касательное напряжение τ_n будет иметь вид

$$\begin{aligned} \tau_n^2 &= \left\{ a_x \cdot a_y (\sigma_x - \sigma_y) + \left[(\tau_{xy} \cdot a_y^2 - \tau_{yx} \cdot a_x^2) \right] \right\}^2 + \\ &+ \left\{ a_x \cdot a_z (\sigma_x - \sigma_z) + \left[(\tau_{xz} \cdot a_z^2 - \tau_{zx} \cdot a_x^2) \right] \right\}^2 + \\ &+ \left\{ a_y \cdot a_z (\sigma_y - \sigma_z) + \left[(\tau_{yz} \cdot a_z^2 - \tau_{zy} \cdot a_y^2) \right] \right\}^2. \end{aligned}$$

Если $\tau_{xy} = \tau_{yx}$, $\tau_{yz} = \tau_{zy}$, $\tau_{zx} = \tau_{xz}$, тогда

Подставим значения направляющих косинусов (6)...(11) в выражения для контактных касательных напряжений, получим

$$\begin{aligned} \tau_n^2 &= \left\{ a_x \cdot a_y (\sigma_x - \sigma_y) + \left[\tau_{xy} \cdot (a_y^2 - a_x^2) \right] \right\}^2 + \\ &+ \left\{ a_x \cdot a_z (\sigma_x - \sigma_z) + \left[\tau_{zx} \cdot (a_z^2 - a_x^2) \right] \right\}^2 + \\ &+ \left\{ a_y \cdot a_z (\sigma_y - \sigma_z) + \left[\tau_{yz} \cdot (a_z^2 - a_y^2) \right] \right\}^2. \end{aligned} \quad (15)$$

Подставляя направляющие косинусы (6)...(11) в (15), для контактного касательного напряжения можно записать

$$\begin{aligned} \tau_n^2 &= \cos^2 \psi \cdot \left\{ \frac{\sin 2\varphi}{2} (\sigma_x - \sigma_y) - \left[\tau_{xy} \cdot \cos 2\varphi \right] \right\}^2 + \\ &+ \cos^2 \delta \cdot \left\{ \frac{\sin 2\lambda}{2} (\sigma_x - \sigma_z) - \left[\tau_{zx} \cdot \cos 2\lambda \right] \right\}^2 + \\ &+ \cos^2 \eta \cdot \left\{ \frac{\sin 2\phi}{2} (\sigma_y - \sigma_z) - \left[\tau_{yz} \cdot \cos 2\phi \right] \right\}^2. \end{aligned} \quad (16)$$

Выражения для составляющих касательных контактных напряжений

$$\begin{aligned} \tau_{nxy} &= \pm \cos \psi \cdot \left\{ \frac{\sin 2\varphi}{2} (\sigma_x - \sigma_y) - \left[\tau_{xy} \cdot \cos 2\varphi \right] \right\}; \\ \tau_{nzx} &= \pm \cos \delta \cdot \left\{ \frac{\sin 2\lambda}{2} (\sigma_x - \sigma_z) - \left[\tau_{zx} \cdot \cos 2\lambda \right] \right\}; \\ \tau_{nyz} &= \pm \cos \eta \cdot \left\{ \frac{\sin 2\phi}{2} (\sigma_y - \sigma_z) - \left[\tau_{yz} \cdot \cos 2\phi \right] \right\}, \end{aligned} \quad (17)$$

где φ , λ , ϕ – углы, расположенные в плоскостях xy , zx , yz , между проекциями вектора на плоскости и соответствующими координатными осями. Следует отметить, что предложенные выше формулы не являются плоскими решениями задачи, это возможно тогда, когда косинусы $\cos \psi, \cos \delta, \cos \eta$ равны единице.

Если в выражениях (16)...(17) возможны варианты, когда

$$\begin{aligned}\tau_{xy} &= T_{ix} \cdot \sin A_1 \Phi_1; \quad \sigma_x - \sigma_y = 2 \cdot T_{ix} \cdot \cos A_1 \Phi_1; \\ \tau_{yz} &= T_{iy} \cdot \sin A_2 \Phi_2; \quad \sigma_y - \sigma_z = 2 \cdot T_{iy} \cdot \cos A_2 \Phi_2; \\ \tau_{zx} &= T_{iz} \cdot \sin A_3 \Phi_3; \quad \sigma_x - \sigma_z = 2 \cdot T_{iz} \cdot \cos A_3 \Phi_3,\end{aligned}\quad (18)$$

где T_{ix}, T_{iy}, T_{iz} – значения обобщенных характеристик напряженного состояния в направлении осей x, y, z ; $A_1 \Phi_1, A_2 \Phi_2, A_3 \Phi_3$ – аргумент функции, определяемые координатными переменными очага деформации.

Тогда после подстановки (18) в (16), (17) получим следующее

$$\begin{aligned}\tau_n^2 &= T_{ix}^2 \cdot \cos^2 \psi \cdot \sin^2(A_1 \Phi_1 - 2\varphi) \\ &+ T_{iy}^2 \cdot \cos^2 \eta \cdot \sin^2(A_2 \Phi_2 - 2\phi) + \\ &+ T_{iz}^2 \cdot \cos^2 \delta \cdot \sin^2(A_3 \Phi_3 - 2\lambda); \quad (19) \\ \tau_{nxy} &= T_{ix} \cdot \cos \psi \cdot \sin(A_1 \Phi_1 - 2\varphi), \\ \tau_{nyz} &= T_{iy} \cdot \cos \eta \cdot \sin(A_2 \Phi_2 - 2\phi), \\ \tau_{nzx} &= T_{iz} \cdot \cos \delta \cdot \sin(A_3 \Phi_3 - 2\lambda).\end{aligned}\quad (20)$$

Такие подходы уже известны при решении плоских задач теории упругости и пластичности, [6]. Представляет интерес их использовать при решении пространственной задачи механики сплошной среды. Выражения (19), (20) в сравнении с (4), (12), (13), (14), (15) значительно упростились, что позволяет их наглядно использовать для анализа и более обоснованного выбора решения пространственной задачи. Однако принятие условия (18) должно быть подтверждено данными об их реальности [7], и целесообразности использования в решении объемной задачи механики сплошной среды.

Выводы:

1. Показаны обобщающие подходы получения аналитических зависимостей граничных условий пространственной задачи механики сплошной среды.

2. Получены аналитические выражения для определения контактных касательных напряжений объемной задачи.

3. Показана возможность использования тригонометрической подстановки в объемной задаче механики сплошной среды.

Список литературы

1. Безухов Н.И. Основы теории упругости, пластичности и ползучести / Безухов Н.И. – Высшая школа, 1968. – 498 с. (с ил.).
2. Соколовский В.В. Теория пластичности / Соколовский В.В. – М.: Высшая школа, 1962. – 608 с.
3. Nadai A. Handbush der Physik. Bd – 2. Berlin, 1928.
4. Качанов Л.М. Основы теории пластичности / Качанов Л.М. – М.: Наука, 1969. – 419 с.
5. Чигиринский В.В. Граничные условия в решениях прикладных задач теории пластичности. Збірник наукових праць Дніпровського державного техн-го ун-ту, Вип.1(32), Кам'янське, 2018, С.33...41.
6. Чигиринский В.В. Производство высокоэффективного металлопроката / Чигиринский В.В., Мазур В.Л., Леготкин Г.И., Слепынин А.Г., Шевченко Т.Г. – Днепропетровск. РВА "Дніпро-ВАЛ", 2006. – 261 с.
7. Клименко П.Л. Контактные напряжения при прокатке / Клименко П.Л., Данченко В.Н. – Днепропетровск: «ПОРОГІ», 2007. – 285 с.

References (transliterated)

1. Bezuhov N.I. Osnovy teorii uprugosti, plastichnosti i polzuchesti / Bezuhov N.I. – Vysshaya shkola, 1968. – 498 p. (s il.).
2. Sokolovskij V.V. Teoriya plastichnosti / Sokolovskij V.V. – Moscow: Vysshaya shkola, 1962. – 608 p.
3. Nadai A. Handbush der Physik. Bd – 2. Berlin, 1928.
4. Kachanov L.M. Osnovy teorii plastichnosti / Kachanov L.M. – Moscow: Nauka, 1969. – 419 p.
5. Chigirinskij V.V. Granichnye usloviya v resheniyah prikladnyh zadach teorii plastichnosti. Zbirnik naukovih prac Dniprovskogo derzhavnogo tehn-go un-tu, Vol.1(32), Kam'yanske, 2018, p.33...41.
6. Chigirinskij V.V. Proizvodstvo vysokoefektivnogo metalloprokata / Chigirinskij V.V., Mazur V.L., Legotkin G.I., Slepynin A.G., Shevchenko T.G. – Dnepropetrovsk. RVA "Dnipro-VAL", 2006. – 261 p.
8. Klivenko P.L. Kontaktnye napryazheniya pri prokatke / Klivenko P.L., Danchenko V.N. – Dnepropetrovsk: «POROGI», 2007. – 285 p.

Поступила (received) 20.09.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Чигиринский Валерий Викторович (Чигиринський Валерій Вікторович, Chigirinsky Valeriy) – доктор технических наук, профессор, предприятие «Обод», КрКЗ, помощник руководителя Кременчугского колесного завода, г. Кременчуг, Украина. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5887-2747>, e-mail: val.chig1948@gmail.com

Науменко Елена Геннадиевна (Науменко Олена Геннадіївна, Naumenko Elena) – НТУ «Днепропетровская политехника», старший преподаватель кафедры строительной, теоретической и прикладной механики, г. Днепр, Украина. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9532-1493>, e-mail: elenanaumenko1971@gmail.com

Бренер Виктор Александрович (Бренер Віктор Олександрович, Brenner Victor) – ПАО «Институт титана», генеральный директор, г. Запорожье, Украина, e-mail: common@timag.org

ЗМІСТ

Аніщенко О. С., Кухар В. В., Присяжний А. Г., Коренко М. Г., Сагіров Ю. Г. Ротаційна роздача квадратних розтрубів на торцях циліндричних труб.....	3
Аргат Р. Г., Пузир Р. Г., Лелюх С. М., Педун О. О. Теоретичне обґрунтування способу витягування без притискання фланця з кантуванням заготовки днища ресивера автомобіля.....	9
Березуцький В. В., Ільїнська О. І. Ергономічні особливості забезпечення умов праці в офісах.....	14
Касьяненко И. В. Особенности повреждаемости металла сварных соединений трубопроводов.....	22
Kruglyak I. V., Khina V. B., Goranskiy G. G. Obtaining complex diffusion layers using composite saturating environment.....	27
Курпе О. Г., Кухар В. В. Вдосконалення математичної моделі зміни температурного поля смуги перед термомеханічною прокаткою на стані Стеккеля.....	31
Лещенко А. И., Токмаков В. А., Ключников К. Ю. Методы расчета напряжения волочения в роликовых волокнах.....	36
Музыкаин Ю. Д., Гайдамака А. В., Татьков В. В., Рязанов А. А. Экспериментальная оценка динамики изменения микротвердости активных поверхностей зубьев редуктора вертикальных валков стана «СЛЯБИНГ 1150» ПАО «ЗАПОРОЖСТАЛЬ».....	42
Ноздрачова К. Л. Ємнісні способи збудження імпульсів ультразвукових хвиль в електропровідних виробках під кутом до поверхні.....	48
Носуленко В. І., Шмельов В. М., Пащенко А. А. Вплив характеру течії робочої рідини на якість обробки в умовах розмірної обробки металів електричною дугою.....	53
Плеснецов Ю. А. Обеспечение устойчивого процесса поштучной формовки специальных гнутых профилей.....	58
Полянский В. И. Теоретическое обоснование условий высокоточной и высокопроизводительной механической обработки деталей машин.....	65
Салам Буссі Особливості використання механізмів електромагнітно-акустичного перетворення при контролі якості прокатних виробів.....	70
Taranenko M., Taranenko I. Interactive controlling at large-dimensional articles forming.....	76
Тришевський О. І., Салтавець М. В., Воробйов Д. С. Методика рішення зворотних задач теплопровідності.....	81
Чигиринский В. В., Бренер В. А., Науменко Е. Г. Анализ граничных условий пространственной задачи механики сплошной среды.....	87

CONTENT

Anishchenko O. S., Kukhar V. V., Prysyazhnyi A. H., Korenko M. G., Sahirov Yu. G. Rotational flaring of square trumpet at the butt-end of cylindrical pipes.....	3
Arhat R. G., Puzyr R. G., Lelukh S. N., Pedun O. O. Theoretical substantiation of the method of extraction without clip holder with curtain preparation of the bottom of the receiver of the car.....	9
Berezutskiy V. V., Ilinska O. I. Ergonomic peculiarities of ensuring of labor conditions in offices.....	14
Kasyanenko I. V. Features of damage to metal of welded pipelines.....	22
Kruglyak I. V., Khina B. B., Goranskiy G. G. Obtaining complex diffusion layers using composite saturating environment.....	27
Kurpe O. H., Kukhar V. V. Refinement of the mathematical model of strip temperature field change before the thermomechanical rolling at the Steckel mill.....	31
Leshchenko A. I., Tokmakov V. A., Kluchnikov K. Y. Methods of calculation of tension of roller die drawing.....	36
Muzykin Yu. D., Haydamaka A. V., Tatkov V. V., Ryazanov A. A. Experimental assessment of the dynamics of changes in the microhardness of the active surfaces of the teeth of the gearbox of the vertical rolls of the mill "SLABYING 1150" PJSC "ZAPORIZHSTAL".....	42
Nozdrachova K. L. Capacitive methods of excitation of pulses of ultrasonic waves in electrically conducting products under angle to the surface..	48
Nosulenko V. I., Shmelyov V. N., Pashchenko A. A. Influence of the character of the flow of the working liquid on the quality of processing in the conditions of dimensional processing of metals by an electric arc.....	53
Plesnetsov Yu. A. Sustaining a sustainable piece process forming special bent profiles.....	58
Polyanskiy V. I. Theoretical substantiation of the conditions of high-precision and high-performance machining of machine parts.....	65
Salam Bussey Features of use of mechanisms of electromagnetic-acoustic transformation in quality control of rolled items.....	70
Taranenko M., Taranenko I. Interactive controlling at large-dimensional articles forming.....	76
Trishevsky O. I., Saltavets N. V., Vorobyev D. S. Technique of solution of reverse tasks of heat conduction.....	81
Chigirinsky V. V., Brener V. A., Naumenko E. G. The analysis of boundary conditions in spatial problem of continuum mechanics.....	87

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

**ВІСНИК НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ «ХП».
СЕРІЯ: ІННОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ОБЛАДНАННЯ ОБРОБКИ МАТЕРІАЛІВ
У МАШИНОБУДУВАННІ ТА МЕТАЛУРГІЇ**

Збірник наукових праць

№ 11 (1336) 2019

Наукові редактори: Марченко А.П., д-р техн. наук, професор, НТУ «ХП», Україна,
Плєснецов 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. № 11-19.

Підп. до друку 05.11.2019 р. Формат 60x84 1/8. Папір офсетний. RISO-друк. Гарнітура Таймс.
Ум. друк. арк. 9.6. Обл.-вид. арк. 9,92.
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.