



Sumy State University  
<http://jes.sumdu.edu.ua>

ISSN: 2312-2498

# **ЖУРНАЛ ИНЖЕНЕРНЫХ НАУК**

**JOURNAL  
of ENGINEERING  
SCIENCES**

**ЖУРНАЛ  
ИНЖЕНЕРНЫХ  
НАУК**

**01  
2015**

Міністерство освіти і науки України

The Ministry of Education and Science of Ukraine

Министерство образования и науки Украины

**ЖУРНАЛ ІНЖЕНЕРНИХ НАУК**

**JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES**

**ЖУРНАЛ ИНЖЕНЕРНЫХ НАУК**

Науковий журнал

Scientific Journal

Научный журнал

**Том 2, № 1 (2015)**

Заснований у 1994 році

Founded in 1994

Основан в 1994 году

Сумський державний університет

Sumy State University

Сумский государственный университет

Журнал публікує статті, що висвітлюють актуальні питання сучасного високотехнологічного виробництва, розвитку нових наукових течій у техніці та розроблення технологій майбутнього, підготовлені професорсько-викладацьким складом, аспірантами та фахівцями університету та інших ВНЗ, а також вченими і спеціалістами інших наукових установ. Для викладачів ВНЗ, наукових працівників, аспірантів, конструкторів та виробників.

**ISSN 2312-2498**

Рекомендовано до друку  
вченою радою Сумського державного університету,  
(протокол № 11 від 11.06.2015 року)

Журнал є науковим фаховим виданням ВАК України у галузі технічні науки (Наказ МОН України від 13.07.2015 № 747 «Про затвердження рішень Атестаційної колегії Міністерства щодо діяльності спеціалізованих вчених рад від 30 червня 2015 року». – Режим доступу: <http://old.mon.gov.ua/img/zstored/files/747.rar>).

Публікується за підтримки:

факультету технічних систем та енергоефективних технологій  
Сумського державного університету:  
<http://teset.sumdu.edu.ua/>

кафедри комп'ютерних наук  
Сумського державного університету:  
<http://cs.sumdu.edu.ua/>

ТОВ «Сумитеплоенерго»:  
<http://teplo.sumy.ua/>

<b>Адреса редакційної колегії:</b>	вул. Римського-Корсакова, 2, м. Суми, 40007
<b>Телефони:</b>	(+38 0542) 68-78-52, (+38 0542) 33-41-09
<b>Електронна адреса:</b>	<a href="mailto:jes.sumdu@gmail.com">jes.sumdu@gmail.com</a>
<b>Web-site:</b>	<a href="http://jes.sumdu.edu.ua/">http://jes.sumdu.edu.ua/</a>

Свідоцтво про Державну  
реєстрацію друкованого засобу масової інформації  
КВ № 20499-10299 ПР від 11.12.2013

**РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ****ГОЛОВНИЙ РЕДАКТОР**

Криворучко Д. В., д-р техн. наук, доцент (Сумський державний університет, м. Суми, Україна).

**РЕДАКТОР-КОНСУЛЬТАНТ**

Марцінковський В. А., д-р техн. наук, професор (Сумський державний університет, м. Суми, Україна).

**ЗАСТУПНИКИ ГОЛОВНОГО РЕДАКТОРА**

Залого В. О., д-р техн. наук, професор (Сумський державний університет, м. Суми, Україна);  
Ковальов І. А., канд. техн. наук, професор (Сумський державний університет, м. Суми, Україна);  
Склябінський В. І., д-р техн. наук, професор (Сумський державний університет, м. Суми, Україна);  
Гусак О. Г., канд. техн. наук, доцент (Сумський державний університет, м. Суми, Україна).

**ВІДПОВІДАЛЬНИЙ РЕДАКТОР**

Івченко О. В., канд. техн. наук, доцент (Сумський державний університет, м. Суми, Україна).

**ЧЛЕНИ РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ**

Пляцук Л. Д., д-р техн. наук, професор (Сумський державний університет, м. Суми, Україна);  
Симоновський В. І., д-р техн. наук, професор (Сумський державний університет, м. Суми, Україна);  
Дядюра К. О., д-р техн. наук, доцент (Сумський державний університет, м. Суми, Україна);  
Верещака С. М., д-р техн. наук, професор (Сумський державний університет, м. Суми, Україна);  
Карінцев І. Б., канд. техн. наук, професор (Сумський державний університет, м. Суми, Україна);  
Петраков Ю. В., д-р техн. наук, професор (Національний технічний університет України «КПІ», м. Київ, Україна);  
Федорович В. А., д-р техн. наук, професор

**EDITORIAL BOARD****EDITOR – IN – CHIEF**

Kryvoruchko D. V., Doctor of Engineering Sciences, A. P. (Sumy State University, Sumy, Ukraine).

**ADVISORY EDITOR**

Martsinkovskiy V. A., Doctor of Engineering Sciences, Professor (Sumy State University, Sumy, Ukraine).

**DUPUTY CHIEF EDITORS**

Zaloga V. O., Doctor of Engineering Sciences, Professor (Sumy State University, Sumy, Ukraine);  
Kovalev I. O., Candidate of Sciences (Engineering), Professor (Sumy State University, Sumy, Ukraine);  
Sklabinskiy V. I., Doctor of Engineering Sciences, Professor (Sumy State University, Sumy, Ukraine);  
Gusak O. G., Candidate of Sciences (Engineering), A. P. (Sumy State University, Sumy, Ukraine).

**ASSOCIATE EDITOR**

Ivchenko O. V., Candidate of Sciences (Engineering), A. P. (Sumy State University, Sumy, Ukraine).

**MEMBERS OF EDITORIAL BOARD**

Plyatsuk L. D., Doctor of Engineering Sciences, Professor (Sumy State University, Sumy, Ukraine);  
Simonovskiy V. I., Doctor of Engineering Sciences, Professor (Sumy State University, Sumy, Ukraine);  
Dyadyura K. O., Doctor of Engineering Sciences, A. P. (Sumy State University, Sumy, Ukraine);  
Vereshchaka S. M., Doctor of Engineering Sciences, Professor (Sumy State University, Sumy, Ukraine);  
Karintsev I. B., Candidate of Sciences (Engineering), Professor (Sumy State University, Sumy, Ukraine);  
Petrakov Yu. V., Doctor of Engineering Sciences, Professor (Ukrainian National Technical University "KPI", Kiev, Ukraine);  
Fedorovich V. A., Doctor of Engineering Sciences,

- (Харківський національний технічний університет «ХПІ», м. Харків, Україна);
- Мазур Н. П., д-р техн. наук, професор (Хмельницький національний університет, м. Хмельницький, Україна);
- Сторчак М. Г., д-р техн. наук, професор (Інститут верстатів Університету Штутгарта, м. Штутгарт, Німеччина);
- Кушнер В. С., д-р техн. наук, професор (Омський державний технічний університет, м. Омськ, Росія);
- Верещака А. С., д-р техн. наук, професор (Московський державний технічний університет «Станкін», м. Москва, Росія);
- Клименко С. А., д-р техн. наук, професор (Інститут надтвердих матеріалів ім. В. Н. Бакуля Національної академії наук України, м. Київ, Україна);
- Трищ Р. М., д-р техн. наук, професор (Українська інженерно-педагогічна академія, м. Харків, Україна);
- Віткін Л. М., д-р техн. наук, професор (старший радник Адміністрації Президента України, Навчально-науковий інститут магістерської підготовки та післядипломної освіти Університету «КРОК», м. Київ, Україна);
- Івахненко О. Г., д-р техн. наук, професор (Південно-Західний державний університет, м. Курськ, Росія);
- Отаманюк В. М., д-р техн. наук, професор (Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна);
- Шаповров В. П., д-р техн. наук, професор (Національний технічний університет «ХПІ», м. Харків, Україна);
- Роман Петрус, д-р техн. наук, професор (Жешувська політехніка, м. Жешув, Польща);
- Камбург В. Г., д-р техн. наук, професор (Пензенський державний університет архітектури та будівництва, м. Пенза, Росія);
- Франчишек Похіпі, д-р техн. наук, професор (Технічний університет Брно, м. Брно, Чехія);
- Міхал Вархола, д-р техн. наук, професор (Словацький технологічний університет у Братиславі, м. Братислава, Словаччина);
- Жарковський А. А., д-р техн. наук, професор (Петербурзький державний політехнічний університет, м. Санкт-Петербург, Росія);
- Соложенцев Е. Д., д-р техн. наук, професор (Санкт-Петербурзький державний університет аерокосмічного приладобудування, м. Санкт-Петербург, Росія);
- Караханьян В. К., д-р техн. наук, професор, (Російська асоціація виробників насосів, м. Москва, Росія);
- Свідерський В. А., д-р техн. наук, професор (Національний технічний університет України «КПІ», м. Київ, Україна);
- Сіренко Г. А., д-р техн. наук, професор (Прикарпатський національний університет ім. Василя Стефаника, м. Івано-Франківськ, Україна);
- Захаренко А. В., д-р техн. наук, професор (ЗАТ «БАРРЕНС», м. Санкт-Петербург, Росія);
- Professor (Kharkov National Technical University “KhPI”, Kharkov, Ukraine);
- Mazur N. P., Doctor of Engineering Sciences, Professor (Khmeinitzkiy National University, Khmeinitzsk, Ukraine);
- Storchak M. G., Doctor of Engineering Sciences, Professor (Machine Institute of Stuttgart University, Stuttgart, Germany);
- Kushner V. S., Doctor of Engineering Sciences, Professor (State Technical University, Omsk, Russia);
- Vereshchaka A. S., Doctor of Engineering Sciences, Professor (Moskov State Technical University “Stankin”, Moskov, Russia);
- Klimenko S. A., Doctor of Engineering Sciences, Professor (V. N. Bakul Institute of super hard materials of the National Academy of sciences of Ukraine, Kiev, Ukraine);
- Trishch R. M., Doctor of Engineering Sciences, Professor (Ukrainian engineering and pedagogical Academy, Kharkov, Ukraine);
- Vitkin L. M., Doctor of Engineering Sciences, Professor (Senior Advisor of the Administration of the President of Ukraine, Educational and scientific Institute of Master’s Programmes and Post-Graduate Education of the “KROK” University, Kiev, Ukraine);
- Ivachnenko A. G., Doctor of Engineering Sciences, Professor (South-west State University, Kursk, Russia);
- Otamanyuk V. M., Doctor of Engineering Sciences, Professor, National University “Lvov Polytechnics”, Lvov, Ukraine);
- Shapovrov V. P., Doctor of Engineering Sciences, Professor (Kharkov National Technical University “KhPI”, Kharkov, Ukraine);
- Roman Petrus, Doctor of Engineering Sciences, Professor (Zheschuv Polytechnics, Zheschuv, Poland);
- Kamburg V. G., Doctor of Engineering Sciences, Professor (Penza State University of Architecture and Construction, Penza, Russia);
- Franchischek Pokhipy, Doctor of Engineering Sciences, Professor (Brno Technical University, Brno, Czech);
- Mikhal Varkhola, Doctor of Engineering Sciences, Professor (Slovak Technological University in Bratislava, Bratislava, Slovakia);
- Zharkovkiy A. A., Doctor of Engineering Sciences, Professor (Sankt-Petersburg State Polytechnic University, Sankt-Petersburg, Russia);
- Solozhentsev E. D., Doctor of Engineering Sciences, Professor (Sankt-Petersburg State University of Aerospace Tool-Making, Sankt-Petersburg, Russia);
- Karakhanyan V. K., Doctor of Engineering Sciences, Professor (Russian Federation of Pump Producers, Moscow, Russia);
- Sviderskiy V. A., Doctor of Engineering Sciences, Professor (Ukrainian National Technical University “KPI”, Kiev, Ukraine);
- Sirenko G. A., Doctor of Engineering Sciences, Professor (Vasiliy Stefanik Ciscarpathian National University, Ivano-Frankovsk, Ukraine);
- Zacharenko A. V., Doctor of Engineering Sciences, Professor, (Closed Joint- Stock Company “BARRENS”, Sankt-Petersburg, Russia);

- Павленко В. І., д-р техн. наук, професор (Белгородський державний технологічний університет ім. В. Г. Шухова, м. Белгород, Росія);
- Шаповалов М. А., д-р техн. наук, професор (Белгородський державний технологічний університет ім. В. Г. Шухова, м. Белгород, Росія);
- Колесніков В. І., д-р техн. наук, професор (Ростовський державний університет шляхів сполучення, м. Ростов, Росія);
- Йімінг Кевін Ронг, д-р техн. наук, професор (Вустерський політехнічний інститут, м. Вустер, США);
- Мацевитий Ю. М., д-р техн. наук, професор (Інститут проблем машинобудування Національної академії наук України, м. Харків, Україна);
- Чеслав Кундера, д-р техн. наук, професор (Політехніка Свентокжиська, м. Кельце, Польща);
- Філімоніхін Г. Б., д-р техн. наук, професор (Кіровоградський технічний університет, м. Кіровоград, Україна);
- Львов Г. І., д-р техн. наук, професор (Харківський національний технічний університет «ХПІ», м. Харків, Україна);
- Дзюба А. П., д-р фіз.-мат. наук, професор (Дніпропетровський національний університет, м. Дніпропетровськ, Україна);
- Шубенко А. Л., д-р техн. наук, професор (Інститут проблем машинобудування Національної академії наук України, м. Харків, Україна);
- Гадяка В. Г., канд. техн. наук (Публічне акціонерне товариство «Сумське машинобудівне науково-виробниче об'єднання ім. М. В. Фрунзе», м. Суми, Україна);
- Йозеф Заєць, д-р техн. наук, професор (Технічний університет, м. Кошице, Словаччина);
- Карпусь В. Е., д-р техн. наук, професор (Академія внутрішніх військ МВС України, м. Харків, Україна).
- Pavlenko V. I., Doctor of Engineering Sciences, Professor (Shukhov Belgorod State Technological University, Belgorod, Russia);
- Shapovalov M. A., Doctor of Engineering Sciences, Professor (Shukhov Belgorod State Technological University, Belgorod, Russia);
- Kolesnikov V. I., Doctor of Engineering Sciences, Professor (Rostov State University of Communications, Rostov, Russia);
- Yiming Kevin Wrong, Doctor of Engineering Sciences, Professor (Worcester Polytechnic University, Worcester, USA);
- Matsevityi Yu. M., Doctor of Engineering Sciences, Professor (Institute of Machine- Building Problems of The National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkov, Ukraine);
- Cheslav Kundera, Doctor of Engineering Sciences, Professor (Polytechnica Sventokzhiska, Keltse, Poland);
- Filimonikhin G. B., Doctor of Engineering Sciences, Professor (Kirovograd Technical University, Kirovograd, Ukraine);
- Lvov G. I., Doctor of Engineering Sciences, Professor (Kharkov National Technical University "KhPI", Kharkov, Ukraine);
- Dzyuba A. P., Doctor of Physico-Mathematical Sciences (Dnepropetrovsk State University, Dnepropetrovsk, Ukraine);
- Shubenko A. L., Doctor of Engineering Sciences, Professor (Institute of Machine- Building Problems of The National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkov, Ukraine);
- Gadyaka V. G., Candidate of Sciences (Engineering) (Public joint-stock company "Frunze Sumy Machine-Building Scientific and Production Incorporation");
- Yozhef Zayats, Doctor of Engineering Sciences, Professor (Koshitse Technological Institute, Koshitse, Slovakia);
- Karpus V. E., Doctor of Engineering Sciences, Professor (Academy of Internal Military Forces of the Ministry of Home Affairs of Ukraine, Kharkov, Ukraine).



## ЗМІСТ

ТЕХНОЛОГІЯ МАШИНОБУДУВАННЯ,  
ВЕРСТАТИ ТА ІНСТРУМЕНТИ

A

**О. О. Штегін**

Метод побудови діаграм сталості при фрезеруванні похилих поверхонь сферичними кінцевими фрезами. Частина 2: Побудова діаграм

A 1–A 9

**І. М. Пижов, В. Г. Клименко**

Дослідження ширини контакту різальної поверхні круга з деталлю при плоскому торцевому шліфуванні з нахилом осі шпинделя

A 10–A 15

ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОЧИХ ПРОЦЕСІВ  
У МАШИНАХ ТА АПАРАТАХ

B

**Ю. В. Байдак, М. А. Козьмініх, В. А. Смик**

Моделювання швидкості розподілу повітря у відсіку випарника холодильної установки рефрижераторного контейнера

B 1–B 7

**Д. В. Павленко**

Методика оптимізації каналу матриць для гвинтової екструзії

B 8–B 15

**Б. Н. Поляков**

Принципи побудови системи програмного керування електроприводом сортових ножиць

B 16–B 19

**В. А. Козечко**

Можливий механізм дії геоактиваторів тертя в трибоспряженнях деталей машин

B 20–B 24

**С. В. Пилипенко**

Метод розрахунку величини обтиснень по товщині стінки уздовж конуса деформації станів холодної пільгерної прокатки труб

B 25–B 29

СУЧАСНІ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІ  
ТЕХНОЛОГІЇ

E

**І. І. Головін, Є. В. Цегельник, С. І. Планковський**

Проблеми математичного моделювання процесів лазерного очищення у промисловості

E 1–E 8

**С. Л. Семірненко**

Розроблення процесу сушіння паливних брикетів потоком атмосферного повітря з одночасним охолодженням

E 9–E 14

## ПИТАННЯ МАТЕРІАЛОЗНАВСТВА



F

**К. В. Берладир, А. Ф. Будник, В. А. Сви́дєрський, О. А. Будник, П. В. Руденко**

Вплив геомодифікаторів на структуру та властивості механічно активованого політетрафторетилену

F 1–F 5

## КОМП'ЮТЕРНА ІНЖЕНЕРІЯ



H

**В. В. Москаленко, С. В. Пімоненко**

Інтелектуальна система прогнозування зниження продуктивності віртуальних машин у середовищі хмарних обчислень

H 1–H 7



## СОДЕРЖАНИЕ

ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ,  
СТАНКИ И ИНСТРУМЕНТЫ

A

**А. А. Штегин**

Метод построения диаграмм устойчивости при фрезеровании наклонных поверхностей сферическими концевыми фрезами. Часть 2: Построение диаграмм

A 1–A 9

**И. Н. Пыжов, В. Г. Клименко**

Исследование ширины контакта режущей поверхности круга с деталью при плоском торцовом шлифовании с наклоном оси шпинделя

A 10–A 15

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ  
В МАШИНАХ И АППАРАТАХ

B

**Ю. В. Байдак, Н. А. Козьминых, В. А. Смык**

Моделирование скорости распределения воздуха в отсеке испарителя холодильной установки рефрижираторного контейнера

B 1–B 7

**Д. В. Павленко**

Методика оптимизации канала матриц для винтовой экструзии

B 8–B 15

**Б. Н. Поляков**

Принципы построения системы программного управления электроприводом сортовых ножниц

B 16–B 19

**В. А. Козечко**

Возможный механизм действия геоактиваторов трения в трибосопряжениях деталей машин

B 20–B 24

**С. В. Пилипенко**

Метод расчета величины обжатий по толщине стенки вдоль конуса деформации станов холодной пильгерной прокатки труб

B 25–B 29

СОВРЕМЕННЫЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВ-  
НЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

E

**И. И. Головин, Е. В. Цегельник, С. И. Планковский**

Проблемы математического моделирования процессов лазерной очистки в промышленности

E 1–E 8

**С. Л. Семирненко**

Разработка процесса сушки топливных брикетов потоком атмосферного воздуха с одновременным охлаждением

E 9–E 14

## ВОПРОСЫ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ



F

**К. В. Берладир, А. Ф. Будник, В. А. Свицерский, О. А. Будник, П. В. Руденко**

Влияние геомодификатора на структуру и свойства механически активированного политетрафторэтилена

F 1–F 5

## КОМПЬЮТЕРНАЯ ИНЖЕНЕРИЯ



H

**В. В. Москаленко, С. В. Пимоненко**

Интеллектуальная система прогнозирования снижения продуктивности виртуальных машин в среде облачных вычислений

H 1–H 7





## CONTENTS

<b>ENGINEERING, MACHINES AND TOOLS</b>	● ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	<b>A</b>
<b>O. O. Shtehin</b> A Method of Stability Lobes Building in Ball End Milling of Inclined Surfaces. Part 2: Lobes building		<b>A 1–A 9</b>
<b>I. N. Pyzhov, V. G. Klimenko</b> Investigation of contact width of wheel working surface with workpiece at flat face grinding with sloped spindle axis		<b>A 10–A 15</b>
<b>INVESTIGATION OF WORK PROCESSES IN MACHINES AND DEVICES</b>	○ ● ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	<b>B</b>
<b>Y. V. Baidak, M. A. Kozminykh, V. A. Smyk</b> Simulation of air distribution rate in the evaporator compartment of refrigerating unit of refrigerating container		<b>B 1–B 7</b>
<b>D. V. Pavlenko</b> Optimization technique of the matrix channel for twist extrusion		<b>B 8–B 15</b>
<b>B. Poliakov</b> The Principles of Creation the System of Programmed Control of the electric drive billet shears		<b>B 16–B 19</b>
<b>V. Kozechko</b> Possible effects of geoactivators friction in friction units of machine parts		<b>B 20–B 24</b>
<b>S. V. Pilipenko</b> The development of calculation method for reducing of wall thickness along the cone of deformation at the cold rolling mills		<b>B 25–B 29</b>
<b>MODERN ENERGY –EFFICIENT TECHNOLOGIES</b>	○ ○ ○ ○ ● ○ ○ ○	<b>E</b>
<b>I. I. Golovin, I. V. Tsegelnik, S. I. Plankovskii</b> Problems of mathematical modeling of laser cleaning in industry		<b>E 1–E 8</b>
<b>S. L. Semirnenko</b> The development of the process of drying fuel briquettes using flow of air with a simultaneous cooling		<b>E 9–E 14</b>
<b>PROBLEMS OF MATERIALS SCIENCE</b>	○ ○ ○ ○ ○ ● ○ ○	<b>F</b>
<b>K. V. Berladir, A. F. Budnik, V. A. Sviderskiy, O. A. Budnik, P. V. Rudenko</b> Effect of the geomodifier on properties and structure of mechanically activated polytetrafluoroethylene		<b>F 1–F 5</b>
<b>COMPUTER ENGINEERING</b>	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ●	<b>H</b>
<b>V. V. Moskalenko, S. V. Pimonenko</b> Intelligent system for predict performance degradation of virtual machines in cloud environment		<b>H 1–H 7</b>



## Метод побудови діаграм сталості при фрезеруванні похилих поверхонь сферичними кінцевими фрезами. Частина 2: Побудова діаграм

О. О. Штегін<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Житомирський державний технологічний університет, вул. Черняхівського, 103, м. Житомир, Україна, 10005

### Article info:

Paper received:

29 March 2015

The final version of the paper received:

09 September 2015

Paper accepted online:

30 November 2015

### Correspondent Author's Address:

<sup>1)</sup> shtegin@gmail.com

В цій статті запропонований напіваналітичний метод побудови діаграм динамічної сталості для висхідної та низхідної обробок сферичною кінцевою фрезою поверхні, нахиленої під деяким кутом. У статті наведені результати експериментальних досліджень для апробації методу. Дослідження проводилися для висхідної пазової обробки поверхні, нахиленої під кутами 30 та 45°. Результати підтвердили дієвість методу в невеликому (1,5–2 рази) діапазоні зміни швидкості різання. Це пов'язано з тим, що при істотних змінах швидкості різання мають місце значні зміни сили різання. Також у даній статті доведено, що процес обробки поверхні з меншим кутом нахилу залишається сталим при більших значеннях радіальної глибини різання. На нашу думку, це пов'язано з багатьма факторами, зокрема більшим кутом контакту при обробці менш похилих поверхонь, що призводить до меншої переривчастості процесу різання. Також при обробці поверхонь, нахилених під меншим кутом, має місце менший вплив радіальної складової сили різання, що призводить до відтискання кінцевої фрези від тіла заготовки.

**Ключові слова:** вібрації під час різання, динамічна сталість, діаграми сталості, сферичні фрези, верстати з ЧПК, кінцеве фрезерування.

### ВСТУП

Сьогодні завдяки розвитку обчислювальної техніки дедалі більше досліджується динамічна сталість процесу обробки різанням. Прогностичний підхід до визначення умов сталого різання дозволяє запобігти виникненню вібрацій під час обробки, що, у свою чергу, дозволяє забезпечити вищу якість обробки і стійкість різального інструменту без збільшення собівартості обробки та зниження її продуктивності на відміну від застосування різних механізмів віброгасіння тощо. Таке прогнозування забезпечується використанням теорії діаграм сталості, запропонованої в 60-х роках ХХ ст. спочатку для точіння [0, 2, 3], а потім і для фрезерування [4, 5, 6].

На цей час гостро стоїть питання забезпечення сталої обробки деталей із просторово-складною геометрією сферичними кінцевими фрезами. Вирішення цього питання потребує розроблення завершеної теорії діаграм сталості для всіх випадків обробки просторово-складних поверхонь сферичними кінцевими фрезами. Це питання висвітлюється у працях [7, 8, 9, 10].

У першій частині [11] даної праці було розглянуто вихідні дані, необхідні для побудови діаграм сталості для обробки поверхонь, нахилених під різним кутом. У цій праці, що є другою частиною, запропонований безпосередньо метод побудови діаграм сталості на основі вихідних даних, описаних в [11]. Та-

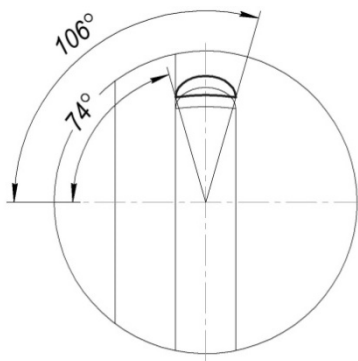
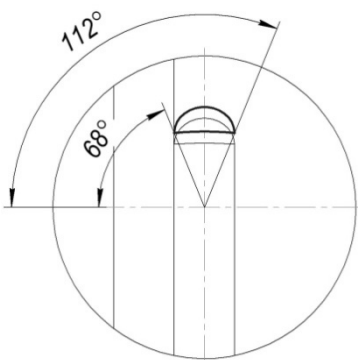
кож у даній праці наведені результати експериментальних досліджень для певних випадків висхідної обробки нахиленої під різними кутами поверхні.

### МЕТОД ПОБУДОВИ ДІАГРАМ

Основною особливістю запропонованого методу є те, що він дозволяє побудувати діаграми динамічної сталості для процесу обробки сферичною кінцевою фрезою поверхні, нахиленої під деяким кутом  $\varphi_a$ . У працях інших авторів, зокрема в [7], не враховується істотна зміна кута контакту фрези та заготовки при зміні радіальної глибини різання в процесі обробки похилої поверхні. У той самий час ми у праці [12] показали, що навіть незначна зміна радіального припуску призводить до істотної зміни геометрії плями контакту, зокрема зміни кута контакту  $\phi_{cont}$ , який обмежується кутами врізання та виходу  $[\phi_{st}; \phi_{ex}]$ . Це, у свою чергу, вносить такі корективи у періодичність дії сили різання, якими не можна знехтувати.

Для прикладу наведемо розраховані за формулами, запропонованими в [11, 12], вихідні дані для висхідної пазової обробки поверхні, нахиленої під кутом  $\varphi_a = 30^\circ$ , сферичною кінцевою фрезою діаметром 10 мм (таблиця 1).

Таблиця 1

$\varphi_a$	$t_r, \text{мм}$	$a_e, \text{мм}$	$\phi_{st}$	$\phi_{ex}$	$\phi_{cont}$	Пляма контакту фрези та заготовки
30°	0,05	1,41	74°	106°	32°	
	0,10	1,99	68°	112°	44°	

Зазначимо, що в даному випадку розглядається саме пазова обробка по висхідній із міркувань того, що реалізація експериментальних досліджень при ній потребує значно меншого часу на підготовку тестів. В інших статтях висвітлюється також зустрічна та попутна обробки.

На осі абсцис діаграми динамічної сталості відкладаються значення частоти обертання шпинделя, а на осі ординат – значення глибини різання. Для системи з одним ступенем вільності, зображеної на рис. 1, граничні значення осевої глибини різання  $t_{lim}$ , при якій процес обробки залишається стабільним, можуть бути визначені [5] за такими формулами:

$$t_{lim} = \frac{2\pi}{z a_{yy} K_t \Re[G_{yy}(j\omega_c)]}, \quad (1)$$

$$a_{yy} = \frac{1}{2} [\cos 2\phi - 2K_r \phi + K_r \sin 2\phi] \phi_{st}^{\phi_{ex}}. \quad (2)$$

У рівняннях (1) та (2):  $z$  – кількість зубів фрези;  $a_{yy}$  – матриця динамічних коефіцієнтів у напрямку осі подачі (рух подачі виконується вздовж осі  $y$ );  $K_t$  – питома тангенціальна складова сили різання, Н/мм<sup>2</sup>;  $K_r$  – питома радіальна складова сили різання (безрозмірна);  $\Re[G_{yy}(j\omega_c)]$  – дійсна частина передавальної функції  $G_{yy}(j\omega_c)$  [9]:

$$\Re[G_{yy}(j\omega_c)] = \frac{1}{k} \frac{1 - \left(\frac{\omega_c}{\omega_n}\right)^2}{\left(1 - \left(\frac{\omega_c}{\omega_n}\right)^2\right)^2 + \left(2\xi \frac{\omega_c}{\omega_n}\right)^2}. \quad (3)$$

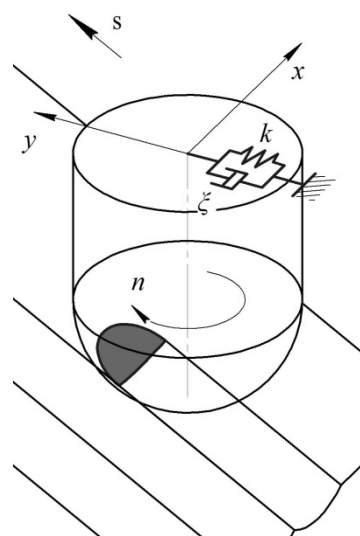


Рисунок 1 – Система з одним ступенем вільності

У рівнянні (3) для визначення передавальної функції:  $k$  – динамічна жорсткість системи;  $\omega_c$  – час-

тота вібрацій;  $\omega_n$  – частота власних коливань;  $\xi$  – демпфування системи.

Під час побудови діаграм сталості для процесу обробки кінцевою фрезою зі сферичним торцем необхідно перейти від осьової глибини різання  $t$  до радіальної глибини різання  $t_r$ , як це зображено на рис. 2.

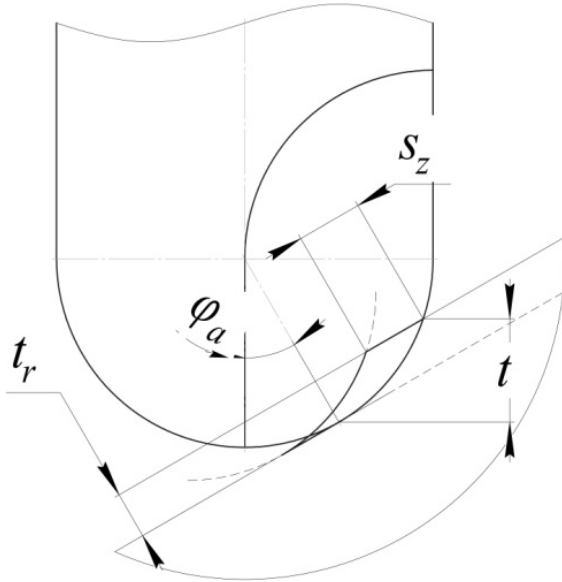


Рисунок 2 – Перехід від осьової глибини різання  $t$  до радіальної глибини різання  $t_r$ .

Цей перехід для сферичної кінцевої фрези з радіусом  $r$  можна здійснити за формулою

$$t_r = r \left( 1 - \cos \left( \arccos \left( \cos \varphi_a - \frac{t}{r} \right) - \varphi_a \right) \right). \quad (4)$$

Як вже зазначалося, зміна радіальної глибини різання призводить до зміни кута контакту фрези та

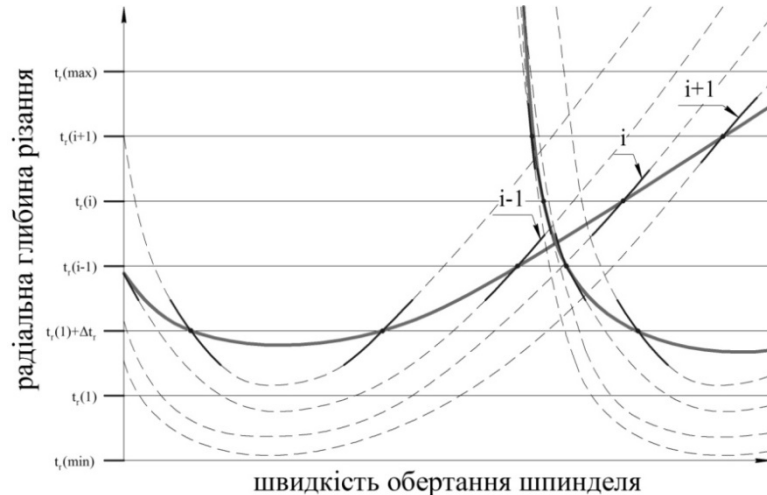


Рисунок 3 – Побудова діаграм сталості для різних значень радіальної глибини різання

заготовки. Іншими словами, діаграма сталості, побудована для певного  $t_r(i)$ , є справедливою лише для даного значення змінної  $t_r$ .

Щоб врахувати цей ефект та держати можливість будувати діаграми сталості для змінної плями контакту, ми запропонували такий напіваналітичний метод.

Перш за все необхідно вибрати діапазон значень радіальної глибини різання  $[t_r(\min); t_r(\max)]$  для якого виконуватиметься обчислення умов сталої обробки.

Після цього необхідно обрати крок  $\Delta t_r$ , з яким виконуватиметься послідовне варіювання всіх значень радіальної глибини різання в межах зазначеного діапазону. Чим меншим буде цей крок, тим більш точною буде одержана діаграма динамічної сталості.

Наступною дією необхідно провести обчислення граничних значень радіальної глибини різання  $t_{r,lim}$  послідовно для всього діапазону із заданим кроком, а також відповідних їм значень швидкості обертання шпинделя.

Так,  $i$ -та діаграма (рис. 3), побудована для кута контакту  $\phi_{cont}(i)$ , що відповідає певному значенню  $t_r(i)$ , є справедливою в межах значень  $t_r(i) \pm \frac{1}{2} \Delta t_r$ .

Діаграма  $(i+1)$ , побудована для кута контакту  $\phi_{cont}(i+1)$ , що відповідає значенню  $t_r(i) + \Delta t_r$ , є справедливою в межах значень  $t_r(i+1) \pm \frac{1}{2} \Delta t_r$ .

Діаграма  $(i-1)$ , побудована для кута контакту  $\phi_{cont}(i-1)$ , що відповідає значенню  $t_r(i) - \Delta t_r$ , є справедливою в межах значень  $t_r(i-1) \pm \frac{1}{2} \Delta t_r$ .

Таким чином, виконавши відповідні дії для всього діапазону значень радіальної глибини різання, одержимо масив точок із масивів точок, що утворює загальну діаграму, з певною точністю справедливою для кожного зі значень діапазону.

### ВИЗНАЧЕННЯ ПОЧАТКОВИХ ДАНИХ

Для апробації методу ми провели експериментальні дослідження для висхідної пазової обробки двох заготовок – відповідно з кутами нахилу  $\varphi_{a,1} = 30^\circ$  та  $\varphi_{a,2} = 45^\circ$ . Матеріал заготовок – конструкційна сталь марки С35 (EN 10277-2: 2008). Твердість матеріалу заготовки за стандартом складає 163 МПа.

Вимірювання сили різання при динамічно стабільній обробці пробних зразків проводили з використанням динамометра моделі Kistler 9257BA.



Вимірювання проводили для пробних зразків, нахилених під різними кутами  $\varphi_a$  (від 0 до 60° із кроком 15°) при швидкостях обертання фрези 3 900 та 4 485 об/хв. Це дозволило проаналізувати поведінку тангенціальної та радіальної складових сили різання при збільшенні швидкості різання як внаслідок зміни частоти обертання фрези, так і внаслідок зміни кута нахилу поверхні. Виміряна питома тангенціальна складова сили різання при швидкості різання 70 м/хв становила 3 300 Н/мм<sup>2</sup>, при швидкості різання 80 м/хв становила 2 900 Н/мм<sup>2</sup>, а при швидкості різання 90 м/хв – 2 600 Н/мм<sup>2</sup>. Таке наближено лінійне зменшення тангенціальної складової сили різання при збільшенні швидкості різання відповідає відомим залежностям. Також вимірювання показали, що питома радіальна складова сили різання є меншою за менших значень кута нахилу поверхні заготовки. Так, при  $\varphi_a = 30^\circ$  коефіцієнт радіальної складової сили різання усереднено становив  $K_{r,30^\circ} = -0,16$ , а при  $\varphi_a = 45^\circ$  – відповідно  $K_{r,45^\circ} = -0,25$ .

## ПОБУДОВА ДІАГРАМ

Одержані в програмі MATLAB за наведеним методом діаграми динамічної сталості для висхідної пазової обробки з кутами  $\varphi_a = 30^\circ$  та  $\varphi_a = 45^\circ$  зображені, на рис. 4.

Під час побудови діаграм були вибрані такі діапазони значень для досліджень: швидкість обертання шпинделя в межах від 4 000 до 6 000 об/хв, що повинно забезпечити швидкість різання близько 60-130 м/хв; радіальна глибина різання від 0 до 0,5 мм із кроком 0,005 мм. Асимптоти визначаються при

значеннях швидкості обертання шпинделя 4 240 та 5 088 об/хв, що є кратними частоті власних коливань фрези.

## ОПИС ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ

Під час проведення експериментів процес різання здійснювався зі сталим значенням подачі для всіх виконаних тестів – 0,14 мм/зуб. Радіальна глибина різання та відповідні їй значення швидкості різання були визначені за характерними точками на прогнозованих діаграмах сталості.

Експериментальна установка зображена на рис. 5. Система «приспособлення-інструмент-деталь» (1) вміщує в себе двозубу сферичну кінцеву фрезу Ø10 мм моделі CoroMill 216 R216-10A16-050 зі змінними твердосплавними пластинами R216-10 02 E-M 1010 фірми Sandvik Coromant (2), затиснену в патроні, та лещата зі сталевую заготовкою (3) з робочою поверхнею, нахиленою під деяким кутом  $\varphi_a$ . Лазерний доплерівський віброметр (ЛДВ) моделі LDV Ometron VH 300+ (4) випромінює лазерний промінь (9) та сприймає відбитий у деякій точці (5) сферичної кінцевої фрези промінь. У процесі того, як сферична кінцева фреза зрізує припуск (8) з поверхні заготовки, виникають вібрації інструменту. Віброметр сприймає вібрації фрези як зміну частоти коливань відбитого від фрези лазерного променя. В аналого-цифровому перетворювачі (6) аналоговий сигнал перетворюється на цифровий та потрапляє до бази даних ноутбука (7). Після цього, виконуючи спектральний та частотно-часовий аналізи коливань у програмному середовищі PULSE LabShop (v. 7.0), визначається, чи мали місце коливання фрези з частотою, близькою до частоти власних коливань, і чи були вони домінуючими в часі.

Таким чином, робиться висновок про динамічну сталість процесу обробки із заданими умовами: процес обробки може

бути динамічно сталим, динамічно несталим або бути на межі динамічної сталості.

Для гарантованого забезпечення умов, за яких виникатимуть вібрації, довжина вильоту фрези з патрона становила  $l = 10d$ .

Виміряна частота власних коливань фрези  $\omega_n$  становила 848 Гц. При цьому коефіцієнт загасання становила  $\xi = 0,03$ , а розрахована динамічна жорсткість фрези  $k = 1\,126$  Н/мм.

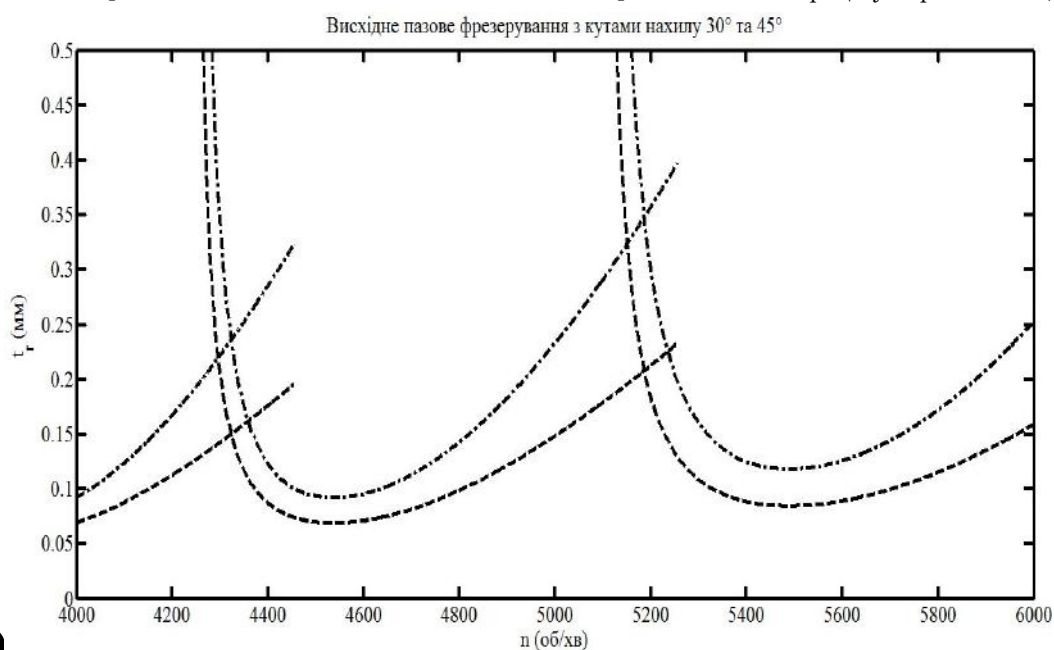


Рисунок 4 - Діаграма сталості для пазової висхідної обробки заготовок з поверхнями, нахиленими під кутами

$\varphi_a = 30^\circ$  (—) та  $\varphi_a = 45^\circ$  (---)

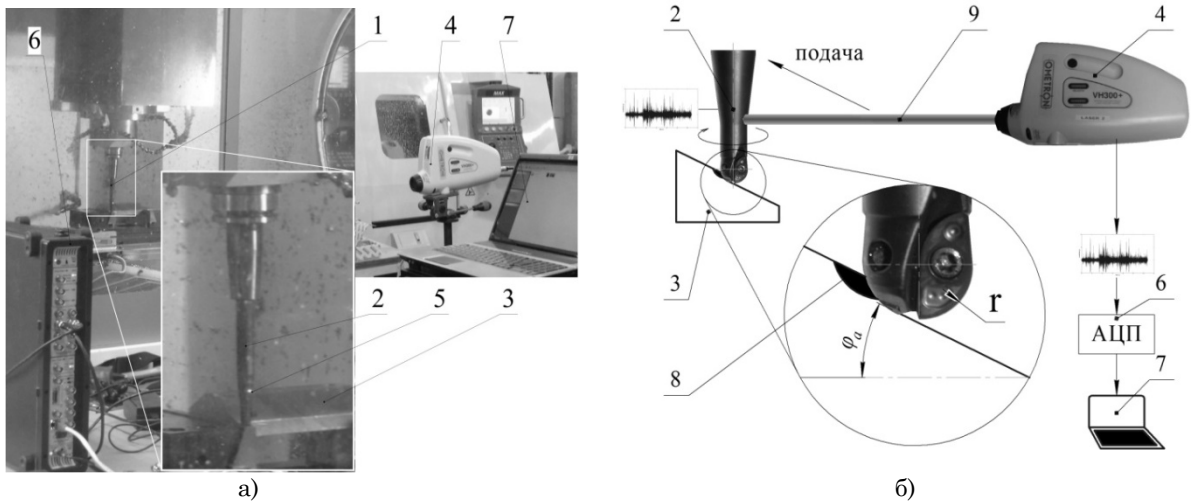


Рисунок 5 - Експериментальна установка: а) фотографія установки; б) схема установки

### АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

На рис. 6 та 9 наведені результати проведених тестів для заготовок із кутами нахилу відповідно  $\varphi_a = 30^\circ$  та  $\varphi_a = 45^\circ$ . На рис. 7 подані спектри коливань для деяких тестів під час обробки заготовки з кутом нахилу  $\varphi_a = 30^\circ$ . На рис. 8 зображено частотно-часове відображення коливань фрези за умов динамічної сталості; спектр коливань для даного випадку наведений на рис. 7 (а). На рис. 6 та 9 позначки  $\times$  відповідають несталій обробці, позначки  $\blacktriangledown$  – гранично сталій, позначки  $\bullet$  – сталій обробці.

Із рис. 7 б бачимо, що в спектрі коливань домінують частоти, кратні частоті проходження зуба фрези, в той час як на рис. 7. в та  $\gamma$  значно домінує частота коливань, значення якої наближене до значення частоти власних коливань фрези. Це свідчить про динамічну несталість процесу.

Побудовані за запропонованим методом діаграми в цілому відповідають експериментальній апробації. При цьому процес висхідної пазової обробки поверхні з кутом нахилу  $\varphi_a = 30^\circ$  залишається сталим при більших значеннях глибини різання, ніж при обробці поверхні з кутом нахилу

$\varphi_a = 45^\circ$ . Так, зокрема, обробка заготовки з кутом нахилу  $\varphi_a = 30^\circ$  зі швидкістю обертання фрези 5 000 об/хв є сталою при глибині обробки 0,20 мм (рис. 6, тест 8), у той час як обробка заготовки з кутом нахилу  $\varphi_a = 45^\circ$  із тією самою швидкістю обертання є несталою при глибині обробки 0,15 мм (рис. 9, тест 2). На нашу думку, така тенденція обумовлюється збільшенням радіальної складової сили різання при збільшенні кута нахилу.

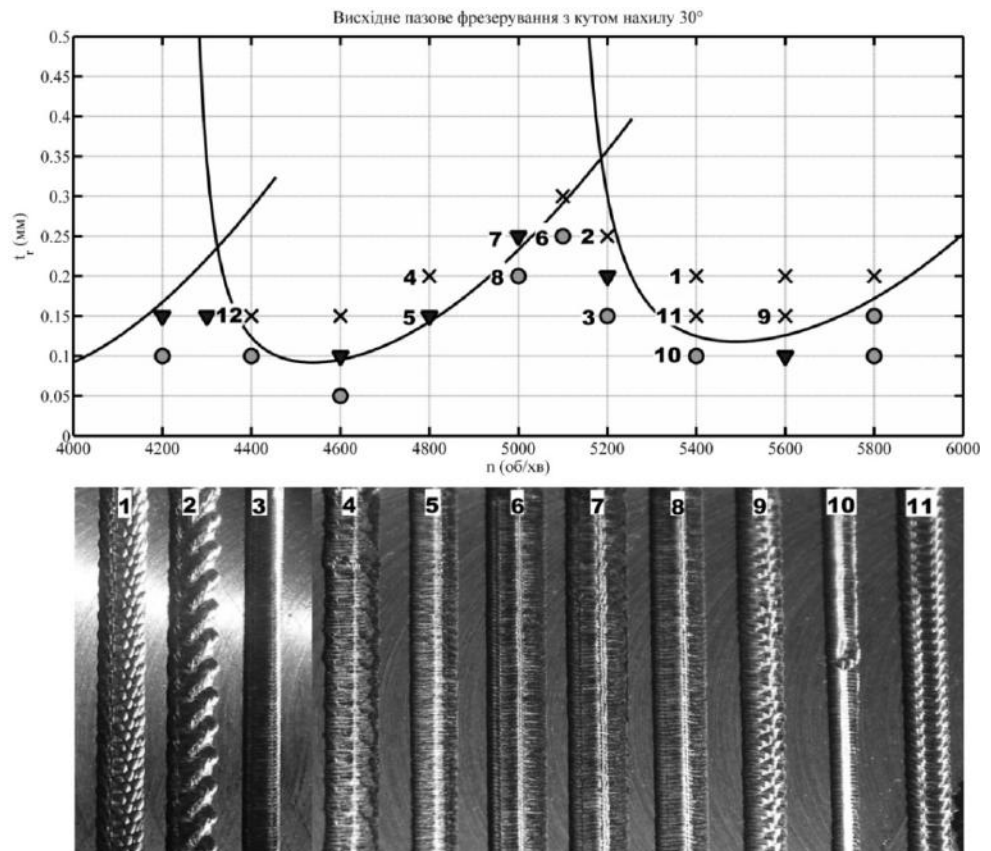


Рисунок 6 - Результати проведених експериментів для обробки заготовки з поверхнею, нахиленою під кутом  $\varphi_a = 30^\circ$

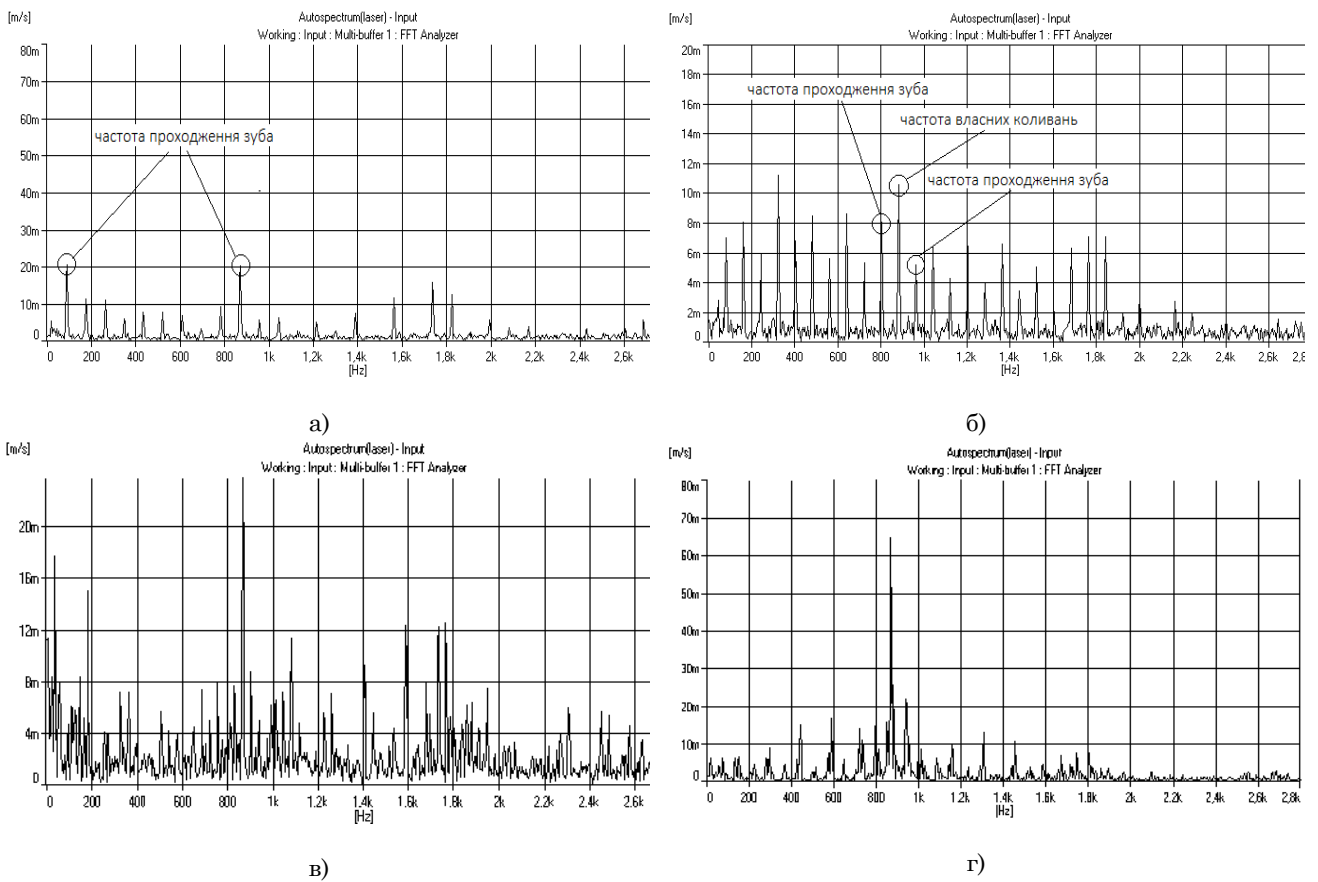


Рисунок 7 - Спектри коливань фрези для обробки заготовки з поверхнею, нахиленою під кутом  $\varphi_a = 30^\circ$  :  
а) стала обробка (тест 3); б) гранично стала обробка (тест 5); в) нестала обробка (тест 1);  
г) нестала обробка (тест 12);

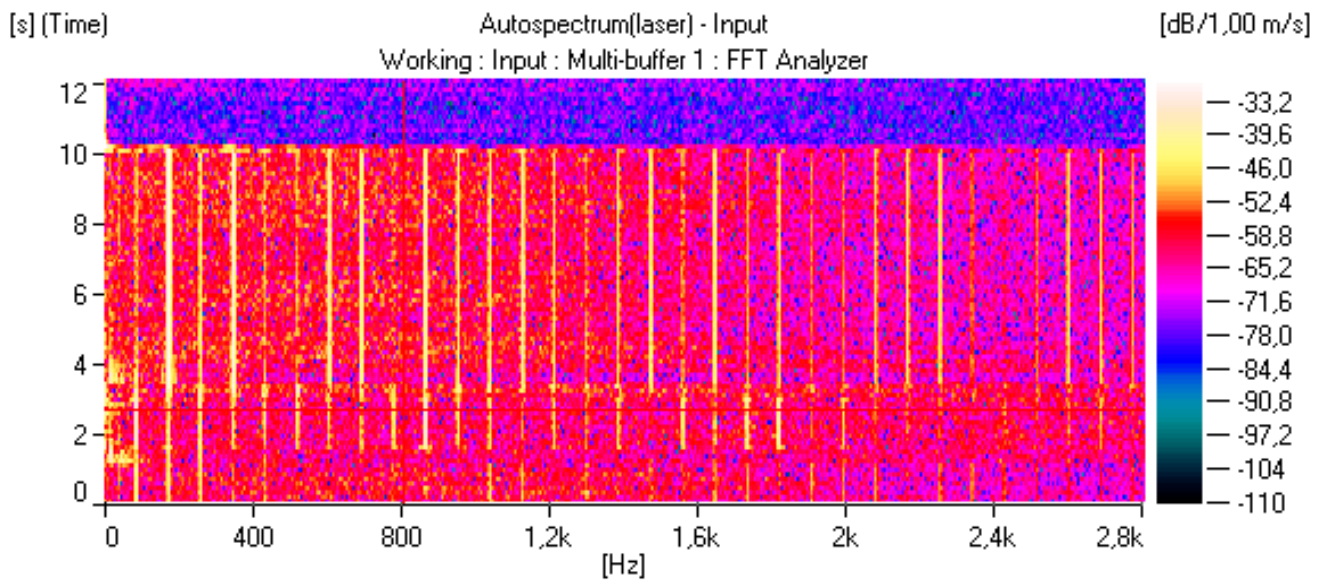


Рисунок 8 - Частотно-часове відображення коливань фрези для обробки заготовки з поверхнею, нахиленою під кутом  $\varphi_a = 30^\circ$  (тест 3)

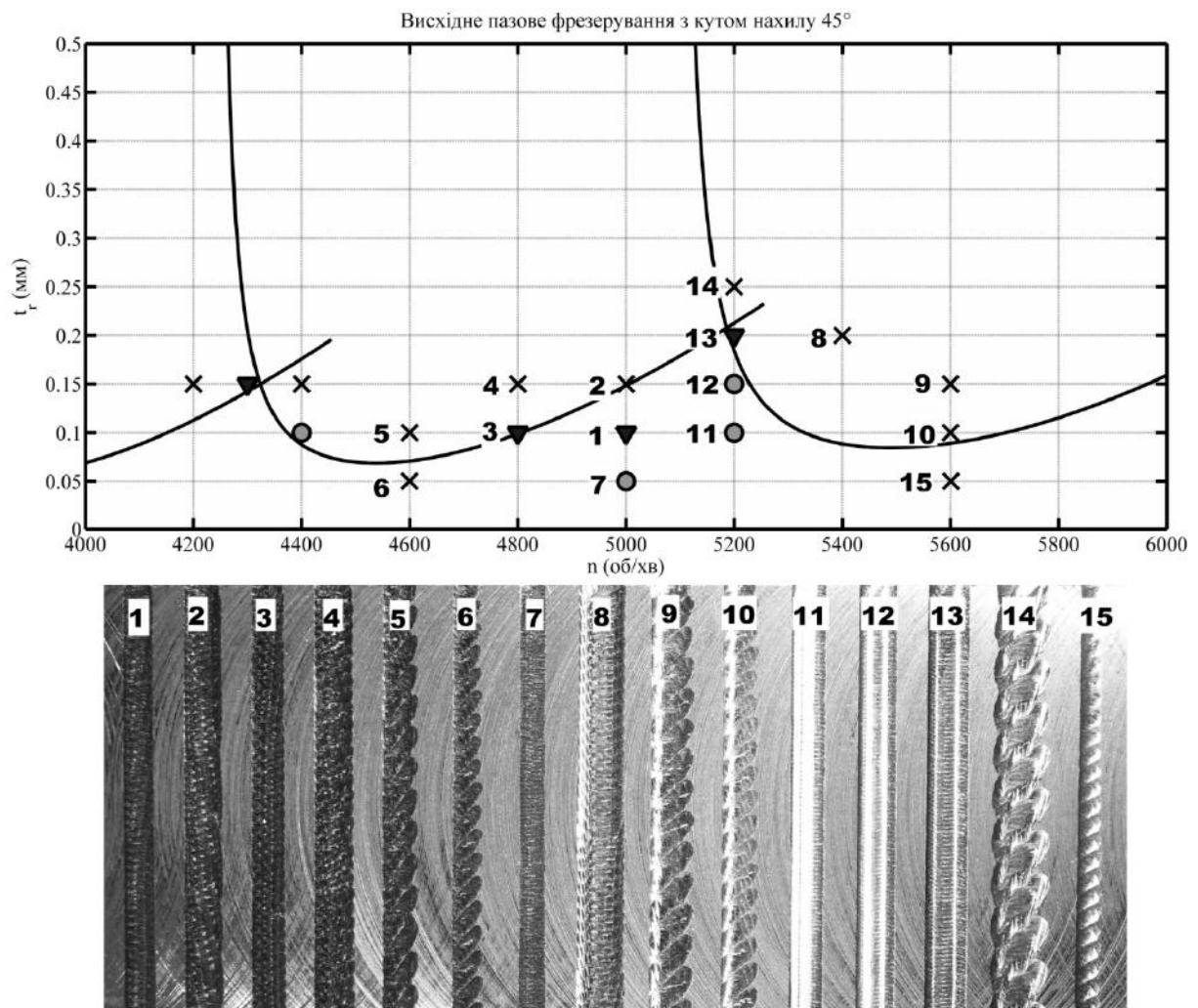


Рисунок 9 - Результати проведених експериментів для обробки заготовки з поверхнею, нахиленою під кутом  $\varphi_a = 45^\circ$

Для повноти картини необхідно порівняти також висхідну та низхідну стратегії обробки, що планується зробити в подальших працях.

## ВИСНОВКИ

У цій статті запропонований метод побудови діаграм динамічної сталості для висхідної та низхідної обробок сферичною кінцевою фрезою поверхні, нахиленої під деяким кутом. Також у статті наведені результати експериментальних досліджень для апробації методу. Дослідження проводилися для висхідної обробки поверхні, нахиленої під кутами  $30^\circ$  та  $45^\circ$ . Результати підтвердили дієвість методу в невеликому діапазоні зміни швидкості різання (в 1,5-2

рази). Для більш загальної картини необхідно враховувати значну зміну сили різання за істотної зміни швидкості різання (як унаслідок збільшення обертів фрези, так і внаслідок зміни кута нахилу заготовки). Доведено, що висхідна пазова обробка поверхні з меншими кутами нахилу за одних і тих самих умов залишається сталою при більших значеннях радіальної глибини різання. Це пов'язано, зокрема, з меншим впливом на збудження вібрацій радіальної складової сили різання при менших кутах. Також зв'язок вбачається у більшому куті контакту фрези та заготовки при менших кутах нахилу її поверхні, що зменшує ступінь переривчастості процесу різання.

## A Method of Stability Lobes Building in Ball End Milling of Inclined Surfaces. Part 2: Lobes building

O. O. Shtehin<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Zhytomyr State Technological University, 103, Chernyakhovskiyi Str., Zhytomyr, Ukraine, 10005



A method of creating a stability lobes diagram in ball end milling of inclined surfaces. Part II: Creating a lobe diagram.

In this paper was proposed a semianalytic method of creating a stability lobes diagram for upward and downward ball end milling of surface inclined with some angle. The paper shows test results for method approbation. Tests were carried out for upward slot machining of surfaces inclined with the lead angles 30° and 45°. The results confirmed an efficacy of the method in a narrow range (1.5-2 times) of spindle speed values. It occurs due to the considerable changes of cutting force when the cutting velocity increases. Also in this paper were adduced proofs that machining process of the surfaces with smaller lead angle stays stable at greater values of radial cutting depth. In our opinion, it is related to the lot of factors, particularly greater value of the angle of contact in the case of machining of surface with the smaller lead angle value leads to decreasing of interrupted cutting. Also in the case of machining of surface with the smaller lead angle value radial component of the cutting force has lesser degree of impact and as a result there is a lesser of tool bending.

**Key words:** chatter in milling, stability lobes theory, chart permanence, ball end milling, CNC machining, end mill.

## Метод построения диаграмм устойчивости при фрезеровании наклонных поверхностей сферическими концевыми фрезами. Часть 2: Построение диаграмм

А. А. Штегин<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Житомирский государственный технологический университет, ул. Черняховского, 103, г. Житомир, Украина, 10005

В данной статье предложен полуаналитический метод построения диаграмм динамической устойчивости для восходящей и нисходящей обработке сферической концевой фрезой поверхности, наклоненной под некоторым углом. В статье приведены результаты экспериментальных исследований для апробации метода. Исследования проводились для восходящей пазовой обработки поверхности, наклоненной под углами 30 и 45°. Результаты подтвердили действенность метода в небольшом (1,5-2 раза) диапазоне изменения скорости резания. Это связано с тем, что при существенных изменениях скорости резания имеют место значительные изменения силы резания. Также в данной статье доказано, что процесс обработки поверхности с меньшим углом наклона остается постоянным при больших значениях радиальной глубины резания. По нашему мнению, это связано со многими факторами, в частности, большим углом контакта при обработке менее наклонных поверхностей, что приводит к меньшей прерывности процесса резания. Также при обработке поверхностей, наклоненных под меньшим углом, имеет место меньшее влияние радиальной составляющей силы резания, приводящей к отжатию концевой фрезы от тела заготовки.

**Ключевые слова:** вибрации при резании, динамическая устойчивость, диаграммы постоянства, сферические фрезы, станки с ЧПУ, концевое фрезерование.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Tobias S. A. Theory of regenerative machine tool chatter / S. A. Tobias, W. Fishwick //The engineer. – 1958. – Т. 205. – № 7. – С. 199-203.
2. Tobias S. A. The chatter of lathe tools under orthogonal cutting conditions / S. A. Tobias, W. Fishwick // Trans. ASME. – 1958. – Т. 80. – № 2. – С. 1079-1088.
3. Tlustý J., A Method of Analysis of Machine Tool Stability / Tlustý J. // Proc. of the 6th MTDR Conference, Manchester 1965, Pergamon Press.
4. Altintas Y., Analytical prediction of stability lobes in milling / Y. Altintas, E. Budak //CIRP Annals-Manufacturing Technology. – 1995. – Т. 44. – № 1. – С. 357-362.
5. Budak E., Altintas Y. Analytical prediction of chatter stability in milling—part I: general formulation / E. Budak // Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control. – 1998. – Т. 120. – № 1. – С. 22-30.
6. Budak E., Analytical prediction of chatter stability in milling—part II: application of the general formulation to common milling systems / E. Budak, Y. Altintas //Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control. – 1998. – Т. 120. – № 1. – С. 31-36.
7. Altintas Y. Analytical prediction of stability lobes in ball end milling / Y. Altintas et al. //Journal of manufacturing science and engineering. – 1999. – Т. 121. – № 4. – С. 586-592.
8. Ozturk E., Investigation of lead and tilt angle effects in 5-axis ball-end milling processes / E. Ozturk, L. Tunc, E. Budak //International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2009. – Т. 49. – № 14. – С. 1053-1062.
9. Mousseigne M. et al. Predicting the dynamic behaviour of torus milling tools when climb milling using the stability lobes theory / M. Mousseigne et al. //International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2013. – Т. 65. – С. 47-57.
10. Kim S. J., Prediction of chatter in NC machining based on a dynamic cutting force model for ball end milling / S. J. Kim, H. U. Lee, D. W. Cho //International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2007. – Т. 47. – № 12. – С. 1827-1838.
11. Штегин О. О., Метод побудови діаграм сталості при фрезеруванні похилих поверхонь сферичними кінцевими фрезами. Частина 1. Вихідні дані / О. О. Штегин // Журнал інженерних наук. - Том 1. - № 2. - 2014. - С. А 25-А 31
12. Штегин О. О., Визначення кутів врізання та виходу при обробці похилих поверхонь сферичними кінцевими фрезами / О. О. Штегин //Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки. – 2014. – № 3(70). – С. 62-67.

## REFERENCES

1. Tobias, S. A., & Fishwick, W. (1958). Theory of regenerative machine tool chatter. *The engineer*, 205 (7), 199-203.
2. Tobias, S. A., & Fishwick, W. (1958). The chatter of lathe tools under orthogonal cutting conditions. *Trans. ASME*, 80 (2), 1079-1088.
3. Tlustý, J. (1965, September). A method of analysis of machine tool stability. In *Proceeding MTDR* (pp. 5-14).
4. Altıntaş, Y., & Budak, E. (1995). Analytical prediction of stability lobes in milling. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 44 (1), 357-362.
5. Budak, E., & Altıntaş, Y. (1998). Analytical prediction of chatter stability in milling-part I: general formulation. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 120 (1), 22-30.
6. Budak, E., & Altıntaş, Y. (1998). Analytical prediction of chatter stability in milling-part II: application of the general formulation to common milling systems. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 120 (1), 31-36.
7. Altıntaş, Y., Shamoto, E., Lee, P., & Budak, E. (1999). Analytical prediction of stability lobes in ball end milling. *Journal of manufacturing science and engineering*, 121 (4), 586-592.
8. Ozturk, E., Tunc, L. T., & Budak, E. (2009). Investigation of lead and tilt angle effects in 5-axis ball-end milling processes. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 49 (14), 1053-1062.
9. Mousseigne, M., Landon, Y., Seguy, S., Dessein, G., & Redonnet, J. M. (2013). Predicting the dynamic behaviour of torus milling tools when climb milling using the stability lobes theory. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 65, 47-57.
10. Kim, S. J., Lee, H. U., & Cho, D. W. (2007). Prediction of chatter in NC machining based on a dynamic cutting force model for ball end milling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 47 (12), 1827-1838.
11. Shtehin, O. O. (2014). Metod pobudovy diahram stalosti pry frezeruvanni pokhlylykh poverkhon sferychnymy kintsevymy frezamy . Chastyna 1. Vykhidni dani [A Method of Stability Lobes Building in Ball End Milling of Inclined Surfaces. Part I: Initial Data.]. *Journal of engineering sciences. – Volume 1, 2, A 25-A 31* [in Ukrainian].
12. Shtehin, O. O. (2014). Vyznachennya kutiv vrizannya ta vykhodu pry obrobsi pokhlylykh poverkhon sferychnymy kintsevimi frezamy [Definition of start and exit angles in ball end milling of inclined surfaces]. *Visnyk ZHDTU – Reporter of ZSTU*, 3 (70), 62-67 [in Ukrainian].



УДК 621.923

## Дослідження ширини контакту різальної поверхні круга з деталлю при плоскому торцевому шліфуванні з нахилом осі шпинделя

I. М. Пижов<sup>1)</sup>, В. Г. Клименко<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Фрунзе, 21, м. Харків, Україна, 61002;

<sup>2)</sup> Полтавський національний технічний університет ім. Юрія Кондратюка, Першотравневий проспект, 24, м. Полтава, Україна, 36011.

### Article info:

Paper received:

25 May 2015

The final version of the paper received:

09 November 2015

Paper accepted online:

30 November 2015

### Correspondent Author's Address:

<sup>1)</sup> [diamet@inbox.ru](mailto:diamet@inbox.ru)

<sup>2)</sup> [klim\\_poltava@mail.ru](mailto:klim_poltava@mail.ru)

Проведені дослідження, що дозволили виявити деякі особливості формування оброблюваної поверхні при багатопрохідному плоскому торцевому шліфуванні з попереднім нахилом осі шпинделя. Встановлено роль у цьому процесі таких факторів, як кут нахилу осі шпинделя, глибина шліфування, діаметр круга і поперечна подача. Враховуючи важливу роль поперечної подачі, значення якої на етапі попередньої обробки повинно гарантовано забезпечувати відсутність на обробленій поверхні ділянок, що будуть залишатися незачеплені кругом, а на етапі чистової обробки потрібної висоти залишкових гребінців запропоновано узгоджувати значення поперечної подачі з розміром ширини контакту різальної поверхні круга з деталлю. З використанням геометричного комп'ютерного моделювання були проведені дослідження, результатом яких є встановлена емпірична залежність, що пов'язує ширину контакту різальної поверхні круга з деталлю з умовами обробки, і, таким чином, розв'язана задача визначення потрібної величини поперечної подачі. Все це дозволяє вдосконалити процес плоского торцевого шліфування і тим самим розширити його технологічні можливості.

**Ключові слова:** увігнутість, комп'ютерне моделювання, залишкові гребінці, поперечна подача, глибина шліфування, діаметр круга.

### ВСТУП

Процес плоского торцевого шліфування, що виконується на верстатах як із вертикальним, так і з горизонтальним розміщенням шпинделя, може бути реалізований як на «прохід», так і за багатопрохідною схемою обробки [1-4]. Перспективність плоскої схеми шліфування підтверджується тим, що не менше 20 % деталей у машинобудуванні мають плоскі поверхні [5], і значна кількість із них підлягає різним видам обробки (обдирне, попереднє, чистове і прецизійне) на плоскошліфувальних верстатах.

**Поставлення проблеми та аналіз останніх досліджень і публікацій.** Для зменшення ступеня нагріву, а отже, й деформації оброблюваної заготовки під час шліфування, особливо зі збільшеними глибинами обробки, технологи використовують різні технічні прийоми [1-4]. Зокрема, застосовують шліфувальні круги з переривчастою робочою поверхнею на самозагострювальних керамічних і бакелітових зв'язках; використовують круги із суцільною, але вузькою робочою поверхнею; періодично виконують піднутрення робочої поверхні кругів із широкою робочою поверхнею алмазними випрямними інструментами; використовують прогресивні конструкції

пристроїв, призначених для подачі технологічної рідини в зону шліфування; удосконалюють процес правлення круга алмазними олівцями; проводять обробку в суцільному шарі технологічної рідини; використовують попередній нахил осі шпинделя на кут  $\alpha$  для зменшення площі контакту різальної поверхні круга (РПК) з деталлю, застосовують комбіновані процеси шліфування та ін.

Нахил осі шпинделя на кут  $\alpha$  (рис. 1 а) приводить до зміни низки параметрів зони контакту РПК з деталлю, а також впливає на формування оброблюваної поверхні виробу. Залежно від напрямку поздовжньої подачі процес може бути здійснений як за звичайною ( $S_{\text{под.зв.}}$ ), так і глибинною ( $S_{\text{под.гли.}}$ ) схемами (рис. 1). До параметрів зони контакту при застосуванні глибинної схеми можна віднести довжину  $W'$  (рис. 1 б), довжину дуги  $L$  та ширину  $B'$  контакту РПК із деталлю (рис. 2). Зміна цих параметрів приводить до зміни площі контакту круга з деталлю.

Таким чином, позитивним моментом шліфування з нахилом осі шпинделя на кут  $\alpha$  є відносно проста можливість керування площею зони контакту РПК з оброблюваною поверхнею [2, 3], а, отже, й термостійкою напруженістю процесу шліфування.

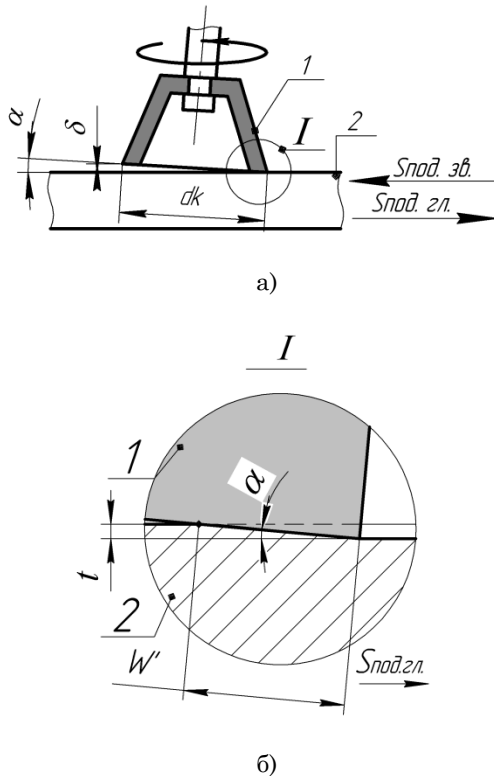


Рисунок 1 - Схема плоского торцевого шліфування з нахилом осі шпинделя: 1 - торцевий круг; 2 - деталь.

Негативний момент полягає в тому, що на оброблюваній поверхні деталі утворюється увігнутість під час шліфування «на прохід» або формуються залишкові гребінці при багатопрохідній схемі обробки.

Аналіз джерел інформації засвідчив, що докладних досліджень відносно встановлення параметрів зони контакту РПК із деталлю та формування оброблювальної поверхні деталі на сьогодні час немає. Є рекомендації нахилити вісь шпинделя верстата на такий кут, щоб зазор  $\delta$  (рис. 1) дорівнював  $\delta = 2$  мм за попередньої і  $\delta = 0,05$  мм за чистової видів обробок (причому незалежно від діаметра круга) [2, 4]. У праці [1] рекомендується брати кут нахилу  $\alpha = 2-4^\circ$  не акцентуючи уваги на вид шліфування.

Дослідження, що ми виконали раніше, із застосуванням комп'ютерного геометричного моделювання [6] дозволили запропонувати залежності, які дозволяють технологу проводити розрахунки довжини зони контакту ( $W'$ ) [7], значень увігнутості [8] під час шліфування «на прохід» та висоти залишкових гребінців [9] при багатопрохідній обробці. У праці [9] було встановлено, що практичне використання багатопрохідної схеми обробки вимагає визначеності величини поперечної подачі. В іншому випадку це може призвести до того, що на обробленій поверхні будуть або залишатися незачеплені кругом ділянки, або формуватися залишкові гребінці, висота яких може перевищувати їх допустиму величину. Це може призвести до появи браку виробів або до необхідності проведення додаткової обробки. Для усунення цього недоліку значення поперечної подачі необхідно задавати залежно від ширини контакту  $B'$  РПК із деталлю. На рисунку 2 наведено схему формування оброблюваної поверхні та показано вплив поперечної подачі на висоту залишкових гребінців при багатопрохідному торцевому шліфуванні.

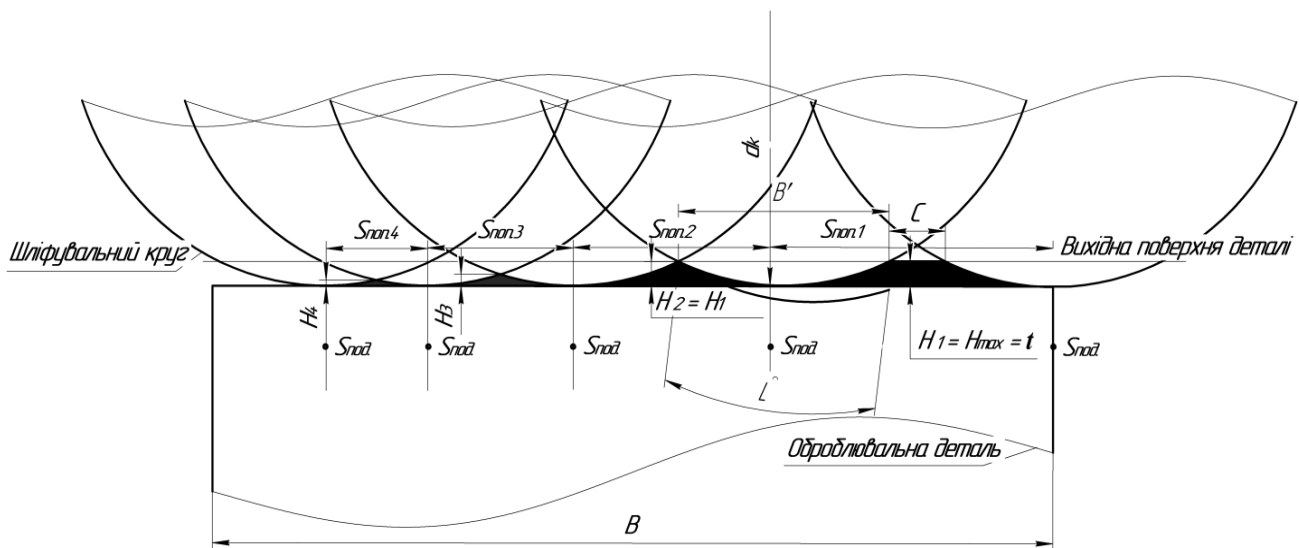


Рисунок 2 - Вплив  $S_{ноп.}$  на висоту залишкових гребінців

$$S_{non.1} > B', S_{non.2} = B',$$

$$S_{non.4} < S_{non.3} < S_{non.2} < S_{non.1}.$$

Контур шліфувального круга умовно показаний у вигляді кола, а для зручності прийнято, що при першому проході вісь круга збігається з одним із країв деталі. Як бачимо з рисунка 2, при багатопрхідному шліфуванні з глибиною  $t$ , поздовжньою  $S_{под}$  та поперечною  $S_{non}$  подачами на оброблюваній поверхні шириною  $B$  формуються ділянки шириною  $B'$  з увігнутістю та залишковими гребінцями певної висоти. При цьому й увігнутість, і залишкові гребінці характеризуються висотним параметром  $H$ . У праці [9] була встановлена залежність цього параметра від умов обробки:

$$H = 0,003 \cdot \alpha \cdot S_{non.2}^{2,039} \cdot d_k^{-0,949}, \quad (1)$$

де  $\alpha$  - кут нахилу осі шпинделя верстата;  $S_{non}$  - поперечна подача, мм/подв. хід;  $d_k$  - зовнішній діаметр шліфувального круга, мм.

Для випадку, коли поперечна подача перевищує свою допустиму величину ( $S_{non.1} > B'$ ), висота гребінців має максимальне значення, тобто  $H_1 = H_{max} = t$ . При цьому характерним є те, що на обробленій поверхні будуть залишатися незачеплені кругом ділянки шириною  $C$ , що недопустимо (якщо лише це не передбачено кресленням). Зі зниженням значення поперечної подачі ( $S_{non.4} < S_{non.3} < S_{non.2} < S_{non.1}$ ) висота залишкових гребінців також зменшується ( $H_4 < H_3 < H_2 < H_1$ ). Максимально допустиме значення поперечної подачі повинно дорівнювати ширині ділянки  $B'$  (тобто  $S_{non.2} = B'$ ). При цьому теоретично на обробленій поверхні не будуть залишатися незачеплені кругом ділянки. У цілому аналіз особливостей застосування процесу плоского торцевого шліфування з попереднім нахилом осі шпинделя за багатопрхідною схемою показав, що значення поперечної подачі потрібно обирати з урахуванням виду обробки. На етапі чистового шліфування поперечна подача повинна призначатися з урахуванням допустимого рівня висоти  $H$  залишкових гребінців згідно із залежності (1) [9]. На етапі попереднього шліфування значення поперечної подачі, з одного боку, повинно бути максимально можливим, що позитивно впливає на продуктивність процесу, а з іншого - гарантовано забезпечувати відсутність на обробленій поверхні ділянок, які будуть залишатися незачепленими кругом.

Для розв'язання цієї задачі необхідно встановити взаємозв'язок ширини  $B'$  контакту РПК із деталлю та умовами обробки.

**Мета досліджень.** Метою досліджень є встановлення взаємозв'язку між шириною контакту РПК із деталлю та умовами обробки при торцевому багатопрхідному шліфуванні з попереднім нахилом осі шпинделя.

**Основні матеріали досліджень.** Поставлене завдання ми вирішили шляхом комп'ютерного геометричного моделювання у середовищі «КОМПАС». Досліджувався вплив глибини шліфування  $t$ , кута попереднього нахилу осі шпинделя  $\alpha$  та діаметра круга  $d_k$  на ширину контакту РПК круга з деталлю  $B'$ . При цьому були зроблені такі допущення.

1. Діаметр круга не змінюється в міру його зношення. Цю вимогу можна реалізувати на практиці за умови, якщо за шліфувальний круг використовують, наприклад, чашку циліндричну.

2. На РПК практично немає площадки зношення (що на практиці забезпечується регулярним правлінням круга, наприклад, алмазним олівцем).

3. Жорсткість технологічної системи висока.

Математична обробка результатів комп'ютерного експерименту методом найменших квадратів дозволила запропонувати таку степеневу залежність (у припущенні, що глибина обробки не перевищує 0,1 мм):

$$B' = 14,92 \cdot t^{0,50} \cdot \alpha^{-0,48} \cdot d_k^{0,50}.$$

Похибка між експериментальними та розрахунковими даними не перевищує 5%. Графіки залежності ширини  $B'$  від умов шліфування наведені на рисунках 3-8.

Використовуючи рівняння (1) та (2), можна запропонувати такий підхід до визначення необхідного значення поперечної подачі в залежності від виду обробки. Ці значення при попередній ( $S_{non.n.}$ ) та чистовій ( $S_{non.ч.}$ ) обробках повинні задовольняти нерівності:

$$S_{non.n.} \leq B' \leq 14,92 \cdot t^{0,50} \cdot \alpha^{-0,48} \cdot d_k^{0,50};$$

$$S_{non.ч.} \leq 2,039 \sqrt{\frac{[H]}{0,003 \cdot \alpha \cdot d_k^{-0,949}}},$$

де  $[H]$  - допустиме значення висоти залишкових гребінців (рис. 2).

При цьому значення поперечної подачі, розраховане за формулою (3), гарантовано забезпечує на етапі попередньої обробки відсутність на обробленій поверхні ділянок, що будуть залишатися незачепленим кругом. Значення поперечної подачі, розраховане за формулою (4), дозволяє забезпечити на етапі чис-

тової обробки потрібний рівень залишкових гребінців  $H$ .

На практиці це може істотно розширити технологічні можливості процесу плоского торцевого багатопрохідного шліфування та уникнути браку шліфованих виробів.

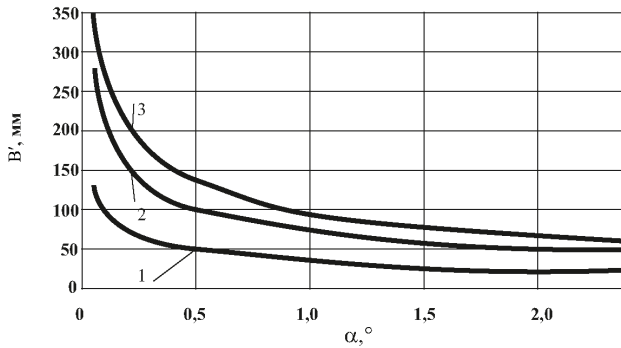


Рисунок 3 - Залежності  $B' = f(\alpha, t)$

1 -  $t = 0,01$  мм; 2 -  $t = 0,05$  мм; 3 -  $t = 0,09$  мм

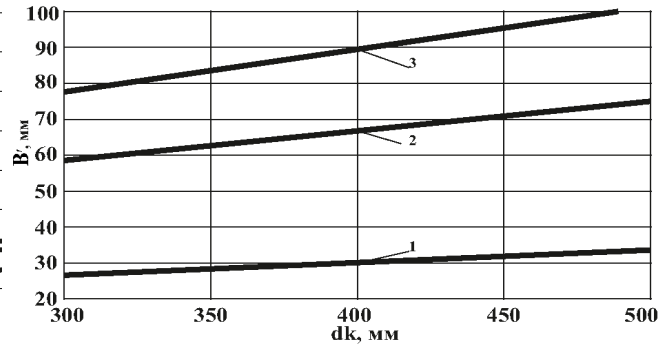


Рисунок 6 - Залежності  $B' = f(d_k, t)$

1 -  $t = 0,01$  мм; 2 -  $t = 0,05$  мм; 3 -  $t = 0,09$  мм

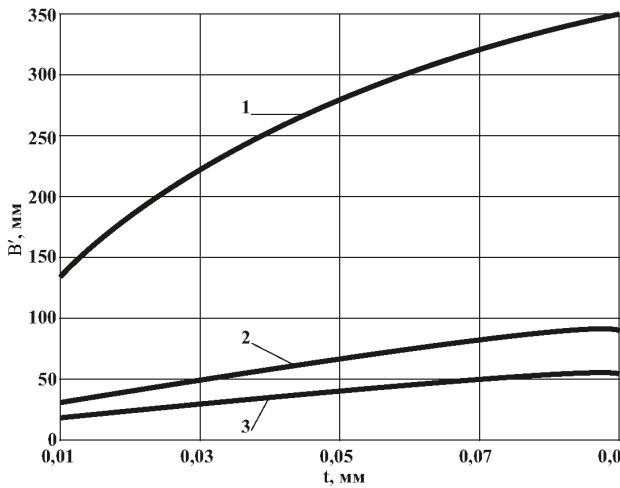


Рисунок 4 - Залежності  $B' = f(t, \alpha)$

1 -  $\alpha = 0,05^\circ$ ; 2 -  $\alpha = 1,00^\circ$ ; 3 -  $\alpha = 2,75^\circ$

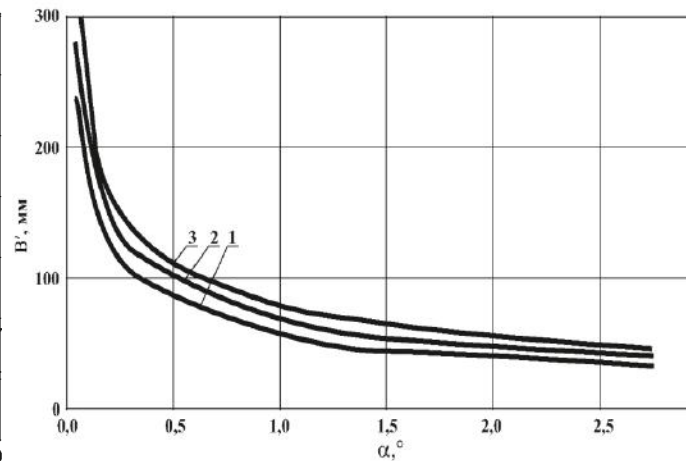


Рисунок 7 - Залежності  $B' = f(\alpha, d_k)$

1 -  $d_k = 300$  мм; 2 -  $d_k = 400$  мм; 3 -  $d_k = 500$  мм

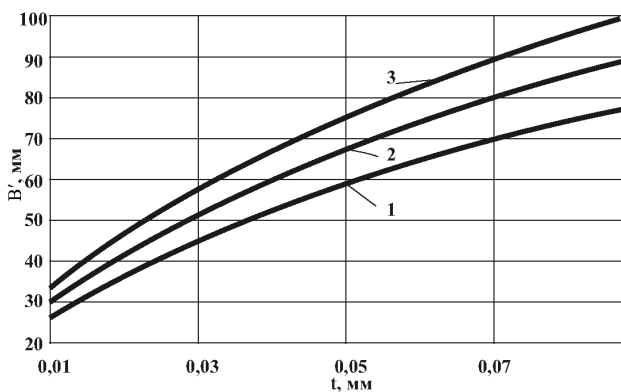


Рисунок 5 - Залежності  $B' = f(t, d_k)$

1 -  $d_k = 300$  мм; 2 -  $d_k = 400$  мм; 3 -  $d_k = 500$  мм

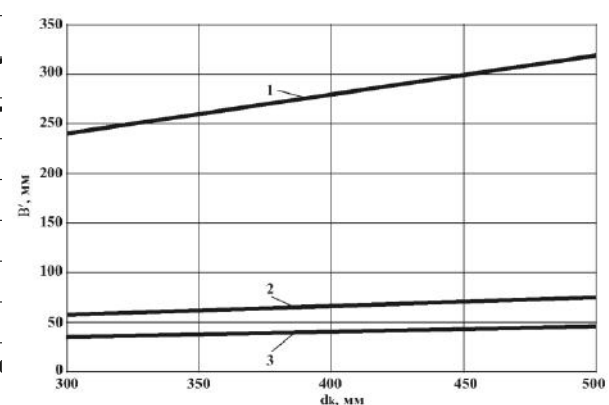


Рисунок 8 - Залежності  $B' = f(d_k, \alpha)$

1 -  $\alpha = 0,05$ ; 2 -  $\alpha = 1,00$ ; 3 -  $\alpha = 2,75$

Одним із фізичних параметрів процесу обробки, що визначають площу контакту РПК з деталлю, є довжина дуги ( $L$ ) контакту РПК із деталлю (див. рис. 2). Ми встановили, що залежність, яка пов'язує цей параметр із умовами обробки, має вигляд

$$L = 15,24 \cdot t^{0,50} \cdot \alpha^{-0,50} \cdot d_{\max}^{0,50}.$$

Аналіз формули (5) показує, що в міру зменшення глибини шліфування та збільшення кута нахилу і діаметра круга значення ширини поступово наближається до довжини дуги контакту круга з деталлю.

**Висновки.** Таким чином, виконані дослідження дозволили встановити таке:

1. За рахунок зміни величини кута попереднього нахилу осі шпинделя можна в достатньо широких межах регулювати значення ширини та довжини

дуги контакту РПК із деталлю. При цьому значно впливають на ширину контакту такі параметри процесу, як глибина обробки та діаметр круга.

2. Під час попередньої обробки значення поперечної подачі повинно узгоджуватися з величиною ширини контакту РПК із деталлю, а на чистовому етапі шліфування - з допустимою висотою залишкових гребінців на оброблюваній поверхні деталі.

3. У міру зменшення глибини шліфування та збільшення кута нахилу і діаметра круга значення ширини поступово наближається до довжини дуги контакту круга з деталлю.

У подальшому становлять певний інтерес дослідження щодо встановлення впливу умов процесу торцевого шліфування з нахилом осі шпинделя на такий параметр, як площа контакту РПК із деталлю як під час обробки на «прохід», так і при багатопрохідному шліфуванні.

## Investigation of contact width of wheel working surface with workpiece at flat face grinding with sloped spindle axis

Ivan N. Pyzhov<sup>1</sup>), Vitaly G. Klimenko<sup>2</sup>)

<sup>1</sup>) National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", 21, Frunze Str., Kharkiv, Ukraine, 61002;

<sup>2</sup>) Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University, 24, Pershotravnevyi avenue, Poltava, Ukraine, 36011.

The investigations that make it possible to reveal some features of the formation of a surface being machined at multipass flat face grinding with the preliminary inclination of the spindle axis are carried out. The role of the factors in this process such as the angle of inclination of the spindle axis, grinding depth, wheel diameter and cross-feed are established. Taking into account the importance of cross-feed, the value of which at the stage of pre-machining is to ensure the absence of the areas on the machined surface, which will remain unaffected with the wheel, and at the stage of finishing is to ensure the desired height of residual ridges, it is proposed to harmonize the value of cross-feed with the value of the width of the contact of the wheel cutting surface with the workpiece. The investigations using computer-aided geometric simulation are carried out, the result is an empirical dependence of the contact width of the wheel cutting surface with the workpiece on machining conditions and thus it is possible to solve the problem of the determination of wanted value of cross-feed. All this make it possible to improve the process of flat face grinding and thereby to expand its technological capabilities.

**Keywords:** concavity, computer-aided modeling, residual ridges, cross-feed, grinding depth, wheel diameter.

## Исследование ширины контакта режущей поверхности круга с деталью при плоском торцевом шлифовании с наклоном оси шпинделя

И. Н. Пыжов<sup>1</sup>), В. Г. Клименко<sup>2</sup>)

<sup>1</sup>) Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», ул. Фрунзе, 21, г. Харьков, Украина, 61002;

<sup>2</sup>) Полтавский национальный технический университет им. Юрия Кондратюка, Первомайский проспект, 24, г. Полтава, Украина, 36011

Выполнены исследования, позволившие выявить некоторые особенности формирования обрабатываемой поверхности при многопроходном плоском торцевом шлифовании с предварительным наклоном оси шпинделя. Установлена роль в этом процессе таких факторов, как угол наклона оси шпинделя, глубина шлифования, диаметр круга и поперечная подача. Учитывая важную роль поперечной подачи, значение которой на этапе предварительной обработки должно гарантированно обеспечивать отсутствие на обработанной поверхности участков, которые будут оставаться незатронутыми кругом, а на этапе чистовой отделки нужной высоты остаточных гребешков предложено согласовы-

вать значения поперечной подачи с размером ширины контакта режущей поверхности круга с деталью. С использованием геометрического компьютерного моделирования были проведены исследования, следствием которых установлена эмпирическая зависимость, связывающая ширину контакта режущей поверхности круга с деталью с условиями обработки и, таким образом, решена задача определения нужной величины поперечной подачи. Все это позволяет усовершенствовать процесс плоского торцевого шлифования и тем самым расширить его технологические возможности.

**Ключевые слова:** вогнутость, компьютерное моделирование, остаточные гребешки, поперечная подача, глубина шлифования, диаметр круга.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Лурье Г. Б. Шлифовальные станки и их наладка / Г.Б. Лурье, В.Н. Комиссаржевская. – М. : Высшая школа, 1972. – 416 с.
2. Наерман М. С. Справочник молодого шлифовщика / М.С. Наерман. М. : Высшая школа, 1985. - 207 с.
3. Лоскутов В. В. Шлифовальные станки / В.В. Лоскутов. - М. : Машиностроение. --1976. – 191 с.
4. Справочник технолога машиностроителя. В 2-х т. Т.1 / Под ред. А. М. Дальского, А. Г. Суслова, А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова. – 5-е изд., исправл. – М. : Машиностроение-1, 2003. – Т. 1. - 944 с.
5. Маталин А. А. Технология машиностроения / А.А. Маталин. - Л.: Машиностроение, 1985. - 496 с.
6. Грабченко А.И. Компьютерное моделирование зоны контакта торцевого круга с деталью на плоскошлифовальных верстаках / А. И. Грабченко, И. М. Пижов, В. Г. Клименко // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи ро-

звитку : матеріали XI Міжнародної науково-технічної конференції. – Краматорськ, - 2013. – С. 62.

7. Клименко В. Г. Вдосконалення процесу плоского торцевого шліфування / В. Г. Клименко, І. М. Піжов. // Високі технології в машинобудуванні : зб. наук. праць. – Харків : НТУ «ХПІ», 2013. - Вип. 1 (23). – С. 68-79.

8. Піжов І. Н. Дослідження особливостей формування відхилень від площинності при плоскому торцевому шліфуванні / І. М. Піжов, В. Г. Клименко // Вісник СевНТУ : зб. наук. пр. Вип. 151/2014. Серія: Машиноприладобудування та транспорт. - Севастополь, 2014. - С. 134-139.

9. Піжов І. М. Деякі особливості багатопрохідного плоского торцевого шліфування / І. М. Піжов, В. Г. Клименко // Резание и инструмент в технологических системах : Междунар. науч.-техн. сб. – Харьков, - 2014. - Вып. 84. - С. 201-210.

## REFERENCES

1. Lur'e, G. B., & Komissarzhevskaya V. N. (1972). Shlifoval'nye stanki i ih naladka [Grinding machines and their adjustment]. Moskva. Vysshaya shkola (in Russian).
2. Naerman, M. S. (1985). Spravochnik molodogo shlifovshchika [Handbook for beginners in grinding]. Moskva. Vysshaya shkola (in Russian).
3. Loskutov, V. V. (1976). Shlifoval'nye stanki [Grinding machines]. Moskva. Mashinostroenie (in Russian).
4. Dal'skij, A. M., Suslova, A. G., Kosilova, A. G., & Mesheryakov, R. K. (2003). Spravochnik tehnologa mashinostroitelya [Manual Machinist technologist]. Moskva. Mashinostroenie-1 (in Russian).
5. Matalin, A. A. (1985). Tehnologiya mashinostroeniya [Mechanical Engineering Technology]. Moskva. Mashinostroenie (in Russian).
6. Grabchenko, A. I., Pizhov, I. M., & Klimenko, V. G. (2013). Komp'yuternye modelyuvannya zoni kontaktu tortseвого kruga z detallyu na ploskoshlifoval'nykh verstatakh [Computer modeling of the contact area of a circle with the mechanical parts on surface grinding machines]. Heavy engineering. Problems and prospects of development. Materialy mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii. (4-6 iyunya 2013 hoda) - proceedings of the international scientific conference (p. 62). Krama-

tors'k (in Ukrainian).

7. Klimenko, V. G., & Pizhov, I. N. (2013). Vdoskonalennya protsesu ploskogo tortseвого shlifuvannya [Improving the process of flat face grinding]. Visoki tehnologiyi v mashinobuduvanni. - High technologies in mechanical engineering: collection of scientific papers. Harkiv, 1 (23), 68-79 (in Ukrainian).

8. Pizhov, I. N., & Klimenko, V. G. (2014). Doslidzhennya osoblyvostej formuvannya vidhilen' vid ploskosti pri ploskomu tortseвому shlifuvanni [Investigation of the features of formation of flatness for flat face grinding]. Visnik SevNTU. Seriya: Mashinopriladobuduvannya ta transport: sbornik nauchnykh trudov. - Bulletin of the SevNTU. Series: mechanical engineering and transport: collection of scientific papers. Sevastopol', 151/2014, 134-139 (in Ukrainian).

9. Pyzhov, I. N., & Klimenko, V. G. (2014). Deiaki osoblyvosti bagatoprohidnogo ploskogo torcheвого shlifuvaniia. [Some features of the multistep flat face grinding]. Rezanie & instrument v tekhnologicheskikh sistemakh. Mezhdunarodnyi nauch. tekhn. sbornik. - Cutting tool and process systems: Intern. scientific and technical collection. Kharkov, 84, 201-210 (in Ukrainian).



УДК 621.565

## Моделювання швидкості розподілу повітря у відсіку випарника холодильної установки рефрижераторного контейнера

Ю. В. Байдак<sup>1)</sup>, М. А. Козьмініх<sup>2)</sup>, В. А. Смик<sup>3)</sup><sup>1)</sup> Одеська національна академія харчових технологій, вул. Канатна, 112, м. Одеса, Україна, 65039<sup>2), 3)</sup> Одеська національна морська академія, вул. Дідріхсона, 8, м. Одеса, Україна, 65029**Article info:**

Paper received:

13 March 2015

The final version of the paper received:

06 June 2015

Paper accepted online:

30 November 2015

**Correspondent Author's Address:**<sup>1)</sup> kozak\_admin@ukr.net<sup>2)</sup> trunonma@gmail.com<sup>3)</sup> smyk2007@ukr.net

Результати роботи стосуються холодильної установки рефрижераторного контейнера і спрямовані на розв'язання задачі розрахунку поля швидкості повітря на виході трубчатого випарника із вентилятором примусового обдування, що розміщений у металевому кожусі. Постановку задачі і її моделювання виконано для двовірної системи координат, а для її розв'язання застосовано програмне середовище COMSOL Multiphysics, Femlab 3.0, Fluid Dynamics - Incompressible Navier-Stokes. Одержані результати дозволяють установити межові умови під час розв'язання задачі розрахунку поля швидкостей повітря у шафі рефрижераторного контейнера і на їх основі при розрахунку розподілу поля температур.

**Ключові слова:** моделювання, рефрижераторний контейнер, холодильна установка, випарник, примусова конвекція, вектор швидкості.

**ВСТУП**

Щорічне виробництво швидкопсувних харчових продуктів у світі сягає 4 мільярдів тонн, з яких майже половина з малим терміном зберігання, а відтак залежить від засобів та умов їх зберігання під час перевезень. Обсяги перевезень визначаються попитом споживчого ринку. Оскільки перевезення здійснюються впродовж тривалого часу і за умов коливань температури навколишнього середовища в межах  $\pm 50$  °C, істотної уваги потребують технічні засоби, що забезпечують зберігання їх якості – рефрижераторні контейнери [3-5].

Питання встановлення потрібної швидкості циркуляції повітря у корисному об'ємі рефрижераторного контейнера є дуже важливим, оскільки суттєво впливає не лише на температуру, вологість збереження якості плодоовочевого вантажу під час його тривалого транспортування, а й на відведення шкідливої дії вуглекислоти, що виділяється з нього з часом і тим самим псує якість. Однак це стосується збереження м'ясної та рибної продукції, оскільки її вивітрювання від надлишку швидкості повітря, утвореного примусовою циркуляцією вентилятора випарника, призводить до втрати вантажем ваги.

На рис. 1 наведено зовнішній вигляд трубчатого випарника холодильної установки і його вентилятора примусової циркуляції повітря від виробника Carrier Transicold, що розміщені у металевому кожусі.

Моделювання явища перенесення повітря конвекцією найчастіше здійснюють у двовірній постановці задачі.

За умов примусового руху повітря у корисному

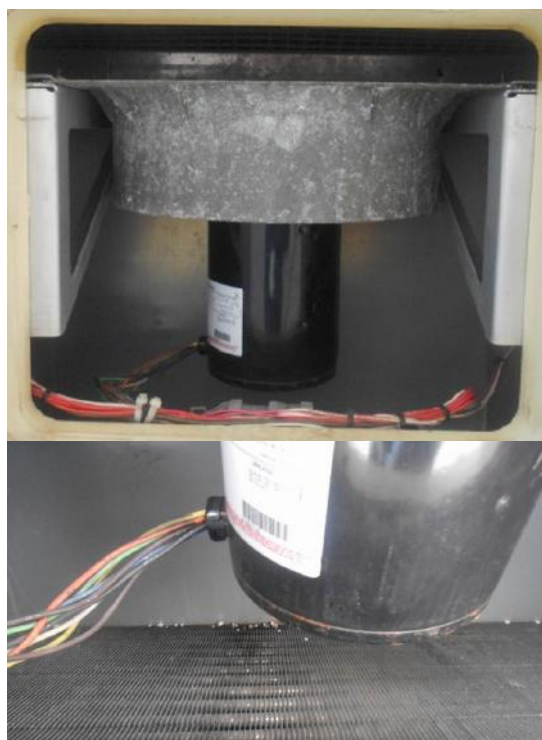


Рисунок 1 - Зовнішній вигляд пристрою трубчатого випарника холодильної установки (внизу) із вентилятором від виробника Carrier Transicold

об'ємі рефрижераторного контейнера й утворений під його впливом розподіл поля температур визначаються динамікою  $T_{i,j} = f(v_{i,j}; \partial v_{i,j} / \partial \tau)$  течії речовини, в якій  $T_{i,j}$  - температура,  $v_{i,j}$  - швидкість,  $\tau$  - час; тиском  $p$  тощо. Водночас теплофізична властивість повітря – в'язкість  $\gamma = f(T_{i,j})$  - впливає на поле швидкостей речовини, оскільки  $(v_{i,j}; \partial v_{i,j} / \partial \tau) = f(\gamma)$ . Відтак розв'язання вирішення задачі перенесення тепла конвекцією зводиться до почергового (ітеративного) розв'язання задач: визначення поля швидкостей речовини за незмінної її в'язкості  $\gamma = const$ ; розрахунку поля температур речовини для одержання поля швидкостей та уточнення в'язкості. Розв'язання задач повторюється в ітераційному циклі за умови одержання збіжності результатів розрахунків і завершується за показником відносної розбіжності значень температур, одержаних у попередній та наступній ітераціях.

Перенесення тепла будь-якою рухомою речовиною визначається законами збереження її маси, кількості руху та енергії та має вигляд диференціальних рівнянь, що пристосовані до елементарного об'єму середовища, крізь поверхню якого здійснюється рух. Розв'язання складених диференціальних рівнянь шляхом їх інтегрування надає можливість визначити обмін тепла конвекцією і, як правило, здійснюється варіаційними методами або чисельно - методом комірок, який застосовує перетворення диференціальних рівнянь у матрицю алгебраїчних їх аналогів. Кожна утворена комірка повинна характеризуватися фізичними й функціональними властивостями речовини, мати певні розміри і бути пов'язаною з сусідніми комірками межовими умовами.

## МАТЕМАТИЧНА ФОРМАЛІЗАЦІЯ ЗАДАЧІ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ЇЇ ЗМІСТ

Для одержання узагальненого рівняння руху конвекцією речовини із густиною  $\rho$ , площею поверхні  $S$ , що обмежує визначений нерухомий об'єм  $V$ , розглянемо рівняння збереження її маси за малий проміжок часу  $dt$  руху крізь поверхню і за наявності утворення додаткової маси внутрішнім джерелом, а

саме у вигляді складової  $\frac{d}{dt} \left( \int_V \rho dV \right)$ . Вважаючи, що

перенесення речовини здійснюється хаотичним рухом її молекул й, одночасно, рухом всієї речовини конвекцією, оцінимо перенесення молекул за густиною  $\bar{J}_\rho$  спрямованої по нормалі  $\bar{n}$  до ізоконцентраційної поверхні  $S$  елементарного об'єму  $V$ , а конвекцію – за щільністю потоку речовини конвекцією  $\bar{v}\rho$  де  $\bar{v}(u,v)$  - лінійна швидкість речовини у двох координатах. Відтак крізь елементарну поверхню  $dS$  об'єму елементарного  $dV$  двома видами перенесення маси речовини здійснюється її витікання обсягом

$$\left[ - \int_S \bar{J}_\rho \cdot \bar{n} dS - \int_S \bar{v} \cdot \bar{n} dS \right] \rho.$$

У разі наявності внутрішнього джерела речовини

до об'єму надходить її кількість обсягом  $\int_V I_\rho dV$ , де

$I_\rho$  - потужність джерела речовини. Здійснивши перехід від поверхневих інтегралів до інтегралів за об'ємом (теорема Остроградського - Гаусса) і скориставшись законом збереження маси речовини в об'ємі, одержуємо рівняння балансу у вигляді виразу

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho dV = - \int_V \nabla \cdot (\rho \bar{v}) dV - \int_V \nabla \cdot \bar{J}_\rho dV + \int_V I_\rho dV,$$

в якому за двомірної постановки задачі і у прямокутній системі координат вектор градієнту

$$\nabla = \bar{i} \frac{\partial}{\partial x} + \bar{j} \frac{\partial}{\partial y},$$

а відтак  $\nabla \cdot \bar{v}$ , є дивергенцією швидкості. Оскільки інтегрування здійснюється за спільним об'ємом, матимемо

$$\int_V \left( \frac{d\rho}{dt} + \nabla \cdot (\rho \bar{v}) + \nabla \cdot \bar{J}_\rho - I_\rho \right) dV = 0$$

з якого випливає, що

$$\frac{d\rho}{dt} + \nabla \cdot (\rho \bar{v}) = - \nabla \cdot \bar{J}_\rho + I_\rho. \quad (1)$$

Рівняння балансу маси речовини свідчить, що у разі нехтування рухом її молекул  $\bar{J}_\rho = 0$  і наявності внутрішнього джерела речовини  $I_\rho = 0$ , воно

спрощується до виразу  $\frac{d\rho}{dt} + \nabla \cdot (\rho \bar{v}) = 0$ . Якщо ж розг-

лядати сталий режим перенесення маси конвекцією, локальна похідна  $\frac{d\rho}{dt} = 0$ , матимемо  $\nabla \cdot (\rho \bar{v}) = 0$  або у

двовимірній постановці задачі

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0.$$

До того ж якщо речовина не стискається, наприклад вода, то  $\rho = const$  і матимемо його у вигляді

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0,$$

який є адекватним для перенесення речовини за незначних змін її температури й тиску.

Як впливає з вищенаведеного, для врахування руху маси речовини потрібно знати її швидкість, а відтак наступним етапом формалізації задачі руху однокомпонентної речовини є розв'язання диференціального рівняння перенесення імпульсу сили -  $K$  або кількості руху. Диференціальне рівняння перенесення імпульсу сили одержують з виразу (1), якщо масу або густину речовини, що переноситься, пов'язати із кількістю її руху (імпульсом сили), віднесеного до одиниці об'єму, на основі другого закону Ньютона:

$$m\bar{a} = m \frac{d\bar{v}}{dt} = \frac{d(m\bar{v})}{dt} = \frac{d\bar{k}}{dt} = \bar{F}.$$

Із урахуванням того, що градієнт густини речовини є пропорційним (розбіжності) дивергенції швидкості  $\bar{\rho} \approx \rho \bar{v}$ , діючій на елементарний об'єм силі відповідатиме загальна зміна кількості руху в самому об'ємі. Отже, швидкість зміни імпульсу сили визначиться сумою: поверхневого інтеграла від щільності потоку імпульсу, що переноситься конвекцією речовини крізь межі визначеного елементарно-

го об'єму; поверхневого інтеграла від тензора механічних напружень (задача Коші) – нормальних та дотичних, що припадають на три ортогональні площини об'єму та обумовлені вектором масового зусилля  $\vec{F}_{i,j}$ , діючого на одиницю маси речовини, тобто як  $\bar{\sigma}_{i,i} = d\vec{F}_{i,j} / dS_i$ , та об'ємного інтеграла від повного вектора масової гравітаційної сили. Поверхневим силам, що виникають під дією сусідніх елементарних об'ємів з речовиною, відповідають напруги, що діють на шість межових поверхонь визначеного кубічного об'єму.

Таким чином, вираз (1) щодо перенесення кількості руху речовини одержує вигляд

$$\frac{d(\rho\vec{v})}{dt} + \nabla \cdot (\rho\vec{v}\vec{v}) = -\nabla \cdot \bar{\sigma} + \rho\vec{F}$$

в якому  $\vec{J}_\rho = \bar{\sigma}$ , а  $I_\rho = \rho\vec{F}$ .

Виконуючи заміну тензора напружень  $\bar{\sigma}$  сумою кульового тензора, пов'язаного зі зміною елементарного об'єму під термодинамічним тиском речовини  $p$  і девіатора напружень (тензора в'язких напружень), пов'язаного зі зміною форми елементарного об'єму внаслідок його деформацій під впливом зміни в'язкості речовини  $\gamma$ , отже її течії, тобто у вигляді  $\bar{\sigma} = p\bar{\delta} + \bar{\gamma}$ , одержуємо диференціальне рівняння перенесення імпульсу сили у вигляді

$$\frac{d(\rho\vec{v})}{dt} + \nabla \cdot (\rho\vec{v}\vec{v}) = -\nabla p - \nabla \cdot \bar{\gamma} + \rho\vec{F}, \quad (2)$$

у якому  $\bar{\delta} = 1$  - дельта-тензор Кронекера (сума двох змінних - одинична діагональна і розріджена матриця).

Ліва частина виразу є сумою локальної зміни кількості руху у часі та за рахунок перенесення тепла конвекцією. Права частина враховує зміну кількості руху під впливом зміни тиску, внутрішнього тертя від зміни в'язкості речовини та дію зовнішніх сил (гравітаційної у випадку, що розглядається).

Рівняння (2) не є самодостатнім для розв'язання, оскільки має дві шукані величини – вектор швидкості речовини  $\vec{v}$  і тензор напружень або щільність молекулярного потоку, що враховується в'язкістю  $\gamma$ .

При розгляді ізотропних речовин із лінійним законом перенесення імпульсу сили для зменшення кількості невідомих у диференціальному рівнянні застосовують реологічне рівняння, що встановлює залежність між девіатором напружень (тензором в'язких напружень)  $\nabla \cdot \bar{\gamma}$  і тензором швидкостей деформацій  $\nabla \cdot (\rho\vec{v}\vec{v})$ . У реологічному рівнянні течії в'язкої ізотропної рідини тензор напружень розглядають у вигляді суми двох складових – ізотропної й неізотропної та за їх співвідношення у виразі як одна до двох третин  $\bar{\sigma} = [p - \varphi(\nabla \cdot \vec{v})]\bar{\delta} + \bar{\gamma}$  і в якому  $\varphi$  - об'ємна в'язкість речовини, якою зазвичай нехтують унаслідок малих значень. За ламінарної течії речовини її в'язкість пов'язують зі швидкістю за законом Ньютона у вигляді  $\gamma = -\eta \frac{\partial v}{\partial n}$ , у якому  $\eta$  -

динамічна в'язкість речовини;  $v$  - швидкість речовини в напрямку руху;  $n$  - нормаль до напрямку швидкості. Для загального випадку реологічне рівняння використовують у вигляді

$$\bar{\gamma} = -\eta \left[ \nabla \cdot \vec{v} + (\nabla \cdot \vec{v})^T \right] + \frac{2}{3} \eta (\nabla \cdot \vec{v}) \bar{\delta},$$

де  $(\nabla \cdot \vec{v})^T$  - тензор, спряжений від тензора  $\nabla \cdot \vec{v}$  (транспонована матриця).

Із урахуванням останнього диференціального рівняння Нав'є - Стокса, що впливає із рівняння перенесення імпульсу сили (2), одержує вигляд

$$\frac{d(\rho\vec{v})}{dt} + \nabla \cdot (\rho\vec{v}\vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot \left\{ \eta \left[ \nabla \cdot \vec{v} + (\nabla \cdot \vec{v})^T \right] \right\} - \frac{2}{3} \eta (\nabla \cdot \vec{v}) + \rho\vec{F}.$$

У разі нестискуваної речовини її щільність  $\rho = const$ , дивергенція швидкості  $\nabla \cdot \vec{v} = 0$ , а отже рівняння спрощується до вигляду

$$\frac{d(\rho\vec{v})}{dt} + \nabla \cdot (\rho\vec{v}\vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot \left\{ \eta \left[ \nabla \cdot \vec{v} + (\nabla \cdot \vec{v})^T \right] \right\} + \rho\vec{F}, \quad (3)$$

а за умов розглядання сталого процесу переміщення речовини, для якого локальна похідна  $\frac{dv}{dt} = 0$ , матимемо

$$\nabla \cdot (\rho\vec{v}\vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot \left\{ \eta \left[ \nabla \cdot \vec{v} + (\nabla \cdot \vec{v})^T \right] \right\} + \rho\vec{F}$$

або як

$$\rho(\nabla \cdot \vec{v})\vec{v} = \nabla \cdot \left[ -p + \eta \left[ \nabla \cdot \vec{v} + (\nabla \cdot \vec{v})^T \right] \right] + \rho\vec{F}. \quad (4)$$

Динамічна в'язкість  $\eta$ , що входить до складу рівняння Нав'є - Стокса у випадку ізотермічного потоку, є незмінною величиною. У загальному випадку – залежить від температури і складу речовини. Взагалі у фізиці векторне рівняння Нав'є - Стокса є системою трьох скалярних рівнянь із шуканими трьома величинами швидкості і тиску. Отже, для розв'язання задачі використовують додаткове – четверте рівняння закону збереження маси – рівняння нерозірваності, яке у випадку речовини, що не стискається має вигляд  $\nabla \cdot \vec{v} = 0$ . Як початкові умови застосовують рівняння  $\vec{v}(\vec{x}) = \vec{v}^0(\vec{x})$ , у якому  $\vec{v}^0(\vec{x})$  - задана гладка вектор-функція, що задовольняє рівняння нерозірваності  $\nabla \cdot \vec{v}^0 = 0$ .

## МОДЕЛЮВАННЯ ШВИДКОСТІ РОЗПОДІЛУ ПОВІТРЯ У ВІДСІКУ ВИПАРНИКА

Під моделюванням вважатимемо застосування методу чисельного дослідження фізичного явища руху повітря у визначеному геометричному об'ємі й накладених на нього межових умовах та на основі його диференціальних рівнянь балансу маси, імпульсу сили.

Метою роботи є визначення межових значень

швидкості й тиску повітря на виході після випарника холодильної машини рефрижераторного контейнера й такого, що, розміщений у металевому кожусі зі звуженням перерізу вихідного отвору й оснащений системою примусової подачі повітря від вентилятора, що приводиться у дію двошвидкісним однофазним асинхронним двигуном.

Із наведеного на рис.1 пристрою випарника впливає, що повітря під дією примусової конвекції, утвореної вентилятором, обтікає встановлену під кутом до напрямку руху повітря поверхню випарника і проходить у каналі звуження (прискорювача), де його швидкість і тиск зростають. Отже, швидкість руху повітря у корисному об'ємі холодильної шафи рефрижераторного контейнера із об'єктами тимчасового утримання є залежною від початкових значень швидкості повітря і його тиску на виході випарника, а також від продуктивності двигуна вентилятора. До того ж розподіл поля температур у холодильній шафі також визначається з урахуванням поля швидкостей повітря.

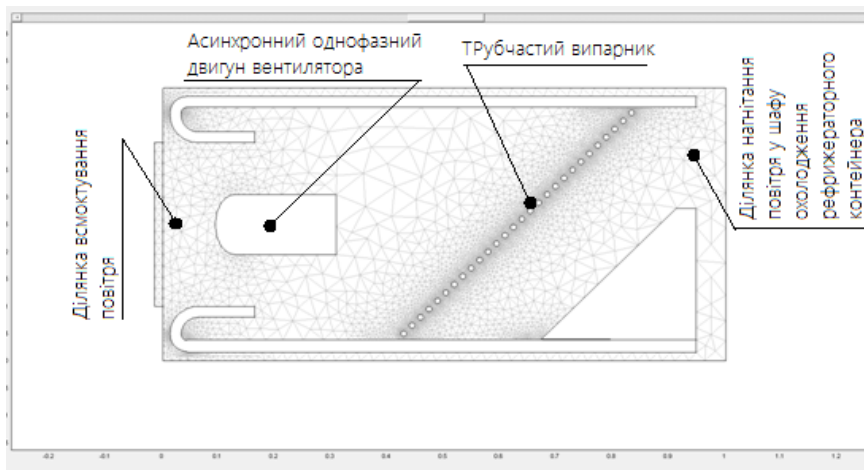


Рисунок 2 - Розрахункова модель випарника холодильної машини, оснащеного вентилятором

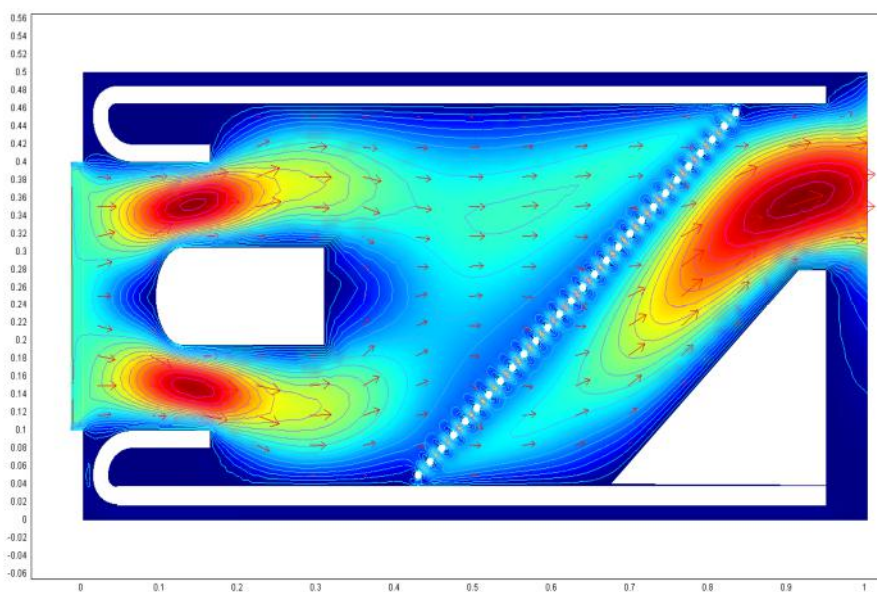


Рисунок 3 - Результати розрахунку поля швидкості повітря у пристрої трубчастого випарника холодильної установки із вентилятором

Для розрахунку межових значень швидкості й тиску повітря на виході після пристрою випарника холодильної машини рефрижераторного контейнера застосовано програмне забезпечення COMSOL Multiphysics Femlab 3.0 у його частині Fluid Dynamics – Incompressible Navier-Stokes.

**Змінні і розмірність моделі.** Розв'язання рівнянь Нав'є - Стокса дозволяє визначити тиск і складові вектора швидкості повітря у просторі геометричних розмірів моделі за рівнянням його потоку (4), у якому:  $\eta = 2.56e-5 (kg/ms)$  - динамічна в'язкість, що встановлює зв'язок між зсувними напруженнями в повітрі до швидкості зсуву;  $\rho = 0.6d (kg/m^3)$  - густина, як властивість повітря;  $\vec{v}$  - вектор поля швидкості або його складові по осях, що залежать від розмірів геометричної моделі;  $p (Pa)$  - тиск;  $F$  - масове зусилля, що визначає розподіл силового поля – гравітаційного [1, 2].

Моделювання задачі починається з формування межових умов однозначності: геометричних, якими задаються форма і розміри об'єкта, в якому здійснюється процес; фізичних, якими встановлюються такі теплофізичні параметри середовища, як щільність, в'язкість; крайових, якими встановлюються початкові значення швидкості, тиску на окремих межах або у середовищі.

У задачі, що розв'язується застосовані межові умови першого і другого роду. Загальний вигляд геометрії області розрахунку, в якому диференціальне рівняння Нав'є - Стокса дозволяє визначити поле швидкості у будь-якій точці, є поділений на елементарні комірки, в яких диференціальне рівняння замінене його кінцево-різнісним аналогом (алгебраїчним рівнянням) (рис. 2), і таким, у якому враховані геометричні розміри комірки та фізичні властивості їх середовища. Отже, алгебраїзація рівняння утворює замість одного рівняння Нав'є - Стокса матрицю рівнянь, розмір якої у двовимірній постановці задачі дорівнює кількості комірок у квадраті.

На рис. 3 наведені результати розрахунку поля швидкостей повітря, що обтікає зовнішню поверхню випарника холодильної установки встановлену по відношенню до вентилятора примусової конвекції під кутом 45°.

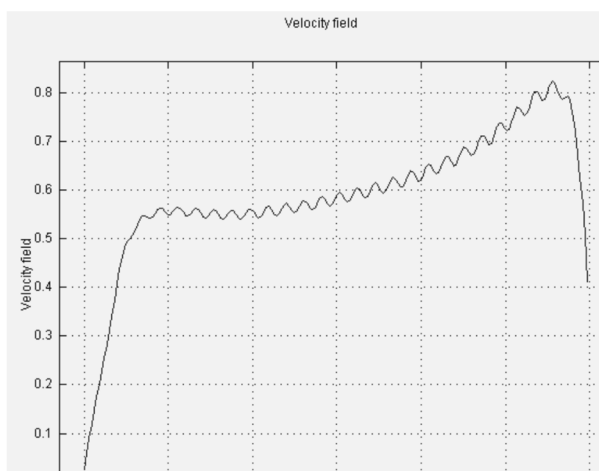


Рисунок 4 - Графіки зміни швидкості повітря до проходження ним випарника

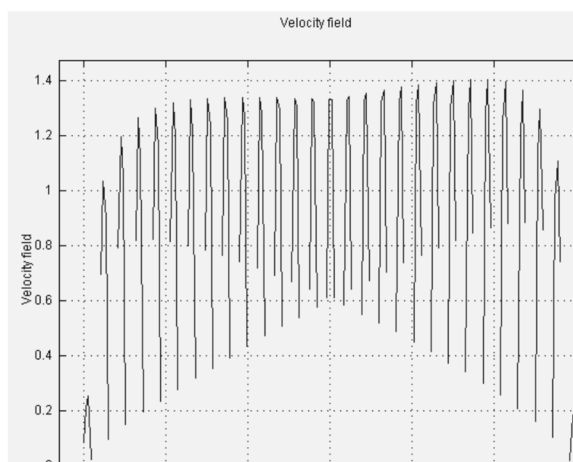


Рисунок 5 - Графіки зміни швидкості повітря вздовж перерізу трубок випарника

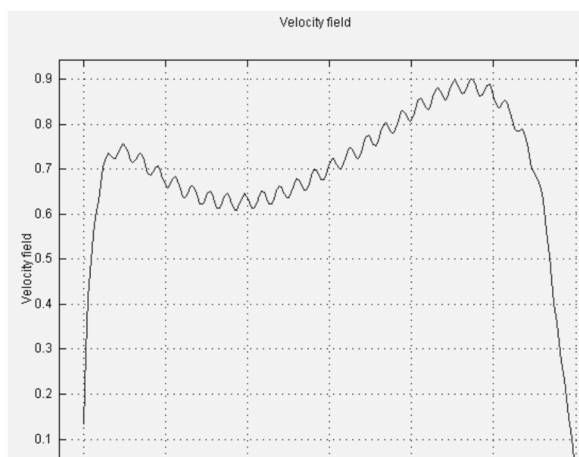


Рисунок 6 - Графіки зміни швидкості повітря після проходження ним випарника



Рисунок 7 - Графік зміни швидкості повітря на виході з шафи охолодження і вході до випарника

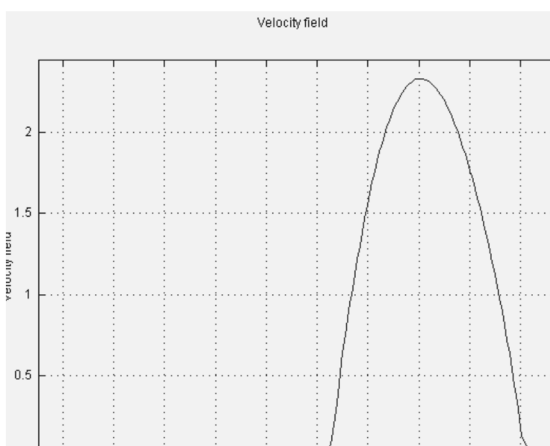


Рисунок 8 - Графік зміни швидкості повітря на виході з випарника і вході до шафи охолодження рефрижераторного контейнера

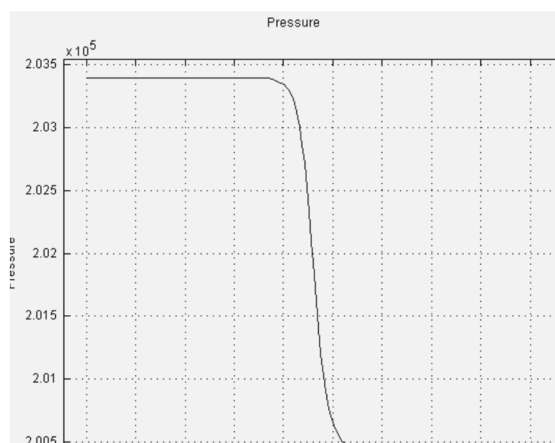
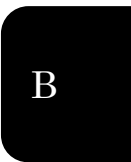


Рисунок 9 - Графік зміни тиску по нормалі до поверхні випарника



На рис. 4, 5, 6 наведені графіки розподілу швидкості повітря до, вздовж і після проходження ним випарника, розміщеного під кутом  $45^\circ$  до осі вентилятора, одержані шляхом моделювання в програмному середовищі Femlab 3.0, а саме в Fluid Dynamics - Incompressible Navier-Stokes.

На рис. 7 наведений аналогічний графік швидкості повітря на ділянці всмоктування його до випарника вентилятором.

Із урахуванням мети роботи – визначити межові умови на виході з випарника, на рис. 8 наведений графік швидкості повітря, що подається до входу в шафу охолодження рефрижераторного контейнера і залежить від умов зміни продуктивності вентилятора та температури зовнішнього середовища.

На рис. 9 наведений графік зміни тиску повітря, який під дією примусової конвекції вентилятора обтікає трубки випарника із синтезованим холодоагентом, проходячи крізь отвори. Графік зміни тиску побудований по нормалі до поверхні випарника.

## ВИСНОВКИ

1. Реалізована у програмному середовищі Femlab 3.0 задача з розрахунку вектора поля швидкості може бути застосована для встановлення початкових умов щодо розрахунку поля вектора швидкості в об'ємі шафи охолодження рефрижераторного контейнера і на їх основі поля температур.

2. Наведено, що вектор швидкості повітря на вході до шафи охолодження рефрижераторного контейнера нерівномірний вздовж межі та має характер параболи, що є важливим під час моделювання поля швидкості у самому рефрижераторі.

3. Результати моделювання поля швидкості повітря на виході з пристрою випарника дозволяють більш ретельно підійти до вибору типу, потужності, ефективної продуктивності асинхронного електродвигуна приводу його вентилятора залежно від побудови повітряного кожуха й вибору форми вихідного сопла.

## Simulation of air distribution rate in the evaporator compartment of refrigerating unit of refrigerating container

Y.V. Baidak<sup>1)</sup>, M. A. Kozminykh<sup>2)</sup>, V. A. Smyk<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> Odessa National Academy of Food Technologies, 112, Kanatnaya Str., Odessa, Ukraine, 65039

<sup>2), 3)</sup> Odessa National Maritime Academy, 8, Didrikhson str., Odessa, Ukraine, 65029

The results of the study relate to the refrigeration unit of refrigerating containers and are aimed at solving the calculating the problem of the air rate field at the outlet of the tubular evaporator with tube axial fan in the metal enclosure. Formulation of the problem and its simulation have been performed for two-dimensional coordinate system, and for its solution software environment COMSOL Multiphysics, Femlab 3.0, Fluid Dynamics - Incompressible Navier-Stokes has been applied. The obtained results allow to establish boundary conditions at solving the calculating problem of the air rates field inside the refrigerating container space, and on its basis, the calculation of temperature field distribution.

**Key words:** simulation, refrigerating container, refrigeration unit, evaporator, forced convection, rate vector.

## Моделирование скорости распределения воздуха в отсеке испарителя холодильной установки рефрижераторного контейнера

Ю.В. Байдак<sup>1)</sup>, Н.А. Козьминых<sup>2)</sup>, В.А. Смык<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> Одесская национальная академия пищевых технологий, ул Канатная, 112, г. Одесса, Украина, 65039

<sup>2), 3)</sup> Одесская национальная морская академия, ул. Дидрихсона, 8, г. Одесса, Украина, 65029

Результаты работы касаются холодильной установки рефрижераторного контейнера и направлены на решение задачи расчета поля скорости воздуха на выходе трубчатого испарителя с вентилятором принудительного обдува, который расположен в металлическом кожухе. Постановку задачи и ее моделирование выполнено для двухмерной системы координат, а для ее решения применена программная среда COMSOL Multiphysics, Femlab 3.0, Fluid Dynamics - Incompressible Navier-Stokes. Полученные результаты позволяют установить граничные условия при решении задачи расчета поля скоростей воздуха в шкафу рефрижераторного контейнера и на их основе при расчете распределения поля температур.

**Ключевые слова:** моделирование, рефрижераторный контейнер, холодильная установка, испаритель, принудительная конвекция, вектор скорости.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Беляев Н. М. Основы теплопередачи: учебник. - К. : Вища школа, 1989. - 343 с.: ил.
2. Gresho, P.M, and Sani, R.L., Incompressible Flow and the Finite Element Method, Volume 1 & 2, John Wiley & Sons, New York, 2000.
3. Pironneau, O., Finite Element Methods for Fluids, John Wiley & Sons, 1989.
4. Rose, Alan, and Simpson, Ben: Laminar, Constant-

Temperature Flow Over a Backward Facing Step, 1st NAFEMS Workbook of CFD Examples. Glasgow, UK, 2000.

5. Rose, Alan & Simpson, Ben: Laminar, Constant-Temperature Flow Over a Backward Facing Step, 1st NAFEMS Workbook of CFD Examples. Glasgow, UK, 2000.

## REFERENCES

1. Belyaev N. M. (1989) Osnovyi teploperedachi: Uchebnik.- K.: Vyischa shk. Golovnoe izd-vo, 343 s.: il.
2. Gresho, P.M, and Sani, R.L. (2000) Incompressible Flow and the Finite Element Method, Volume 1 & 2, John Wiley & Sons, New York
3. Pironneau, O. (1989) Finite Element Methods for Fluids, John Wiley & Sons.
4. Rose, Alan, and Simpson, Ben (2000): Laminar,

Constant-Temperature Flow Over a Backward Facing Step, 1st NAFEMS Workbook of CFD Examples. Glasgow, UK.

5. Rose, Alan & Simpson, Ben (2000) : Laminar, Constant-Temperature Flow Over a Backward Facing Step, 1st NAFEMS Workbook of CFD Examples. Glasgow, UK



## Методика оптимизации канала матриц для винтовой экструзии

Д.В. Павленко<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Запорожский национальный технический университет, ул. Жуковского, 64, г. Запорожье, Украина, 69063

### Article info:

Paper received:

02 February 2015

The final version of the paper received:

16 September 2015

Paper accepted online:

30 November 2015

### Correspondent Author's Address:

<sup>1)</sup> [dvp\\_zntu@mail.ru](mailto:dvp_zntu@mail.ru)

Рассмотрена методика определения напряженно-деформированного состояния образца, подвергнутого интенсивной пластической деформации методом винтовой экструзии. Показана возможность использования метода конечных элементов для оптимизации технологической оснастки при реализации процесса винтовой экструзии. Результаты моделирования показали, что разработанная методика является эффективной для оптимизации параметров винтового канала при проектировании матриц для реализации процесса ИПД методом винтовой экструзии. В результате ее применения возможно выполнение оптимизации профиля винтового канала, установление закономерностей изменения угла закрутки, а также интенсивности и абсолютной величины касательных напряжений и деформаций.

**Ключевые слова:** интенсивная пластическая деформация, винтовая экструзия, метод конечных элементов, субмикроструктурная структура.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Методы интенсивной пластической деформации (ИПД) в последнее время находят самое широкое применение для формирования в объемных заготовках изделий машиностроения субмикроструктурной структуры. Особенности структуры и свойств металлов, подвергнутых интенсивным пластическим деформациям, достаточно хорошо изучены в работах отечественных и зарубежных исследователей и являются основной причиной повышенного интереса к ним. Так, в работах [1, 2] изучены особенности структуры и свойств технически чистого титана в субмикроструктурном состоянии. В работах [3, 4] рассмотрены основные методы получения в материалах субмикроструктурной структуры. В работах [5, 6] на основании исследования структуры и свойств выполнен анализ возможности применения материалов в субмикроструктурном состоянии для деталей авиационной техники. В работах [1, 4, 7] приведены результаты исследования применения метода винтовой экструзии для формирования субмикроструктурной структуры в объемных материалах.

Несмотря на большое количество работ, посвященных изучению структуры и свойств металлов и сплавов после ИПД, в настоящее время исследования, направленные на разработку методик оптимизацию штамповой оснастки для реализации процесса деформирования, ограничены.

Важной задачей на сегодняшний день является разработка новых и совершенствование существую-

щих методов ИПД с целью получения субмикроструктурной структуры для широкой номенклатуры сталей и сплавов. Так, при деформации сложнолегированных сплавов, например, таких как двухфазные сплавы на основе титана, возникают проблемы с выбором рациональных условий и режимных параметров процесса: размеров исходного образца, температуры, степени деформации за один цикл, общего количества циклов деформации и т. д. При выборе нерациональных условий обработки не удается одинаково хорошо прорабатывать структурные элементы сплава во всех сечениях образца. Высокая температура образца не способствует фрагментации структуры и формированию высокоугловых границ зерен, в то время как слишком низкая температура приводит к разрушению образца. В связи с этим в настоящее время номенклатура металлов и их сплавов, в которых удалось сформировать субмикроструктурную структуру, является весьма ограниченной. Аналогичные трудности возникают и при обработке образцов, полученных по перспективной энергосберегающей технологии путем синтеза из металлических порошков [8].

Основными сложностями при разработке технологии ИПД является большое количество факторов, влияющих на реализуемость процесса и качество получаемых образцов. Для оптимизации некоторых из них необходимо проведение опытных работ. Однако параметры, связанные с напряженно-деформированным состоянием (НДС) образца, могут



быть успешно определены с использованием современных методов моделирования.

Большое разнообразие существующих и применяемых в настоящее время методов ИПД в первую очередь объясняется особенностями НДС реализуемого в образце, а также рядом технологических решений. Широко используемый в последнее время метод интенсивной пластической деформации, разработанный и исследуемый в Донецком физико-техническом институте группой под руководством Я. Е. Бейгельзимера [1], заключающийся в том, что призматический образец циклично деформируют в матрице с винтовым каналом постоянного поперечного сечения, закрученного под углом  $\beta$  (рис. 1).

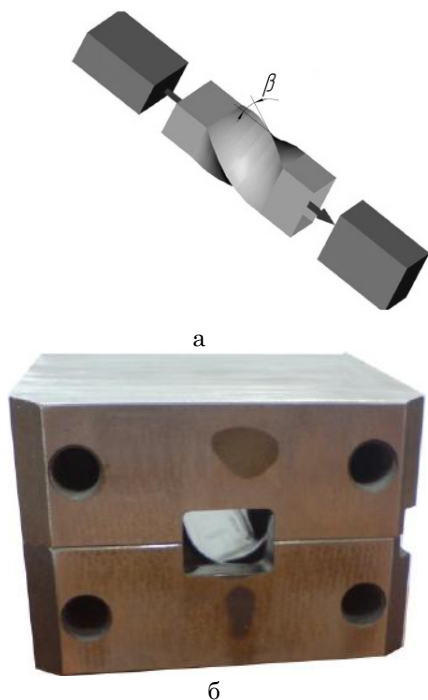


Рисунок 1 – Схема интенсивной пластической деформации призматических образцов методом винтовой экструзии (а) и общий вид разъемной матрицы (б)

Учитывая основные особенности метода винтовой экструзии (ВЭ), его использование является перспективным для получения заготовок из сложнолегированных сплавов, а также порошковых заготовок для изготовления деталей газотурбинных двигателей [4, 6]. Напряженно-деформированное состояние для произвольной точки образца в винтовом канале определяется шаровой и девиаторной составляющими полного тензора напряжений. Высокие значения шаровой компоненты приближает условия деформации к гидростатическому сжатию, что предотвращает разрушение образца. Девиаторная составляющая способствует реализации простого сдвига в плоскости деформации, приводящего к фрагментированию и перемешиванию структуры, а также залечиванию пористости в образцах, синтезированных из смеси порошковых компонентов методами порошковой металлургии [9].

Технически уровень шаровой компоненты НДС определяется величиной противодействия, прикла-

дываемого к торцу образца в процессе ВЭ. Девиаторная составляющая определяется особенностями геометрии винтового канала. Таким образом, эффективность реализации процесса ИПД методом винтовой экструзии зависит от мероприятий, направленных на сохранение целостности образца. Учитывая, что девиатор напряжений в различных сечениях образца определяется исключительно конструктивными особенностями винтового канала, образованного частями винтовой матрицы, его оптимизация является важной задачей при разработке технологии ИПД новых материалов с целью формирования в них однородной субмикроструктурной структуры и устранению пористости в порошковых заготовках.

Целью настоящей работы является разработка и апробация методики оптимизации геометрических параметров винтового канала матрицы для реализации процесса ИПД методом винтовой экструзии. Для достижения цели необходимо решить круг задач, связанных с разработкой методики приложения начальных и граничных условий на деформируемый образец, анализа полей напряжений и деформаций в зависимости от геометрии образца и условий деформирования, а также оценки адекватности.

Необходимость оптимизации геометрических параметров винтового канала связана с особенностями условий, необходимых для реализации процессов перемешивания, фрагментации структуры и залечивания пористости в некомпактных материалах в зависимости от состояния образцов. Оценка и оптимизация НДС особенно важны для образцов, синтезированных из металлических порошков, в связи с необходимостью соблюдения условий сохранения их целостности при каждом цикле деформации.

Приведенные в работе [1] результаты по деформации чистых металлов и технических сплавов с использованием винтовой матрицы, спроектированной на основе результатов физического моделирования процесса течения металла, подтверждают эффективность применения ВЭ. Так, в образце из сплава ВТ1-0 после пяти циклов деформации при температуре 400 °С наблюдалось дробление зерен и гомогенизация структурных составляющих (рис. 2), сопровождающиеся увеличением доли высокоугловых границ и повышением уровня функциональных свойств [6].

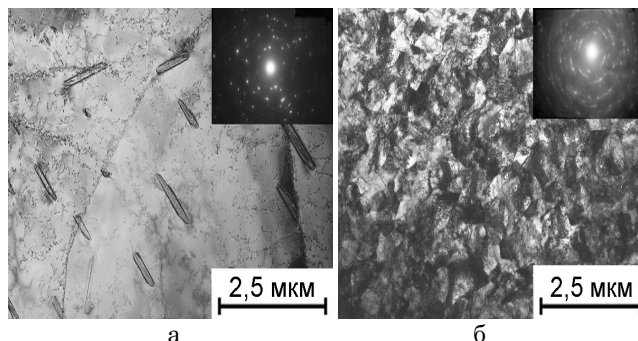


Рисунок 2 – Микроструктура образца из сплава ВТ1-0 в исходном (литом) состоянии (а) и после ВЭ (б) (просвечивающий электронный микроскоп JEM-100CXII)

В ряде случаев попытки деформации титановых образцов винтовой экструзией приводили к разрушению образцов на первом или последующих циклах (рис. 3). Наблюдалась значительная разнородность в центральной и периферийных зонах образцов. Причиной разрушения и разнородности являлось неблагоприятное сочетание параметров ИПД. Например, к разрушению образцов может приводить недостаточная величина противодавления, а причиной появления разнородности – недостаточное количество циклов деформации. В случае применения винтовой матрицы неразъемного типа разрушение в ней образца может приводить к полному выходу из строя дорогостоящей оснастки.



Рисунок 3 – Образец из сплава ВТ1-0 до (а) и после деформации (б), а также разрушившийся в процессе винтовой экструзии (в)

Для исключения подобных явлений и получения гомогенной субмикроструктурной структуры во всем объеме образца необходимо соблюдение с учетом свойств деформируемого сплава и размеров образца ряда условий [1]. Так, необходимо наличие касательных напряжений достаточных для дробления структурных элементов, а также зон «перетекания» материала в пределах поперечного сечения образца, достаточной для гомогенизации структуры. Выполнение этих условий возможно за счет оптимизации конструктивных параметров винтовой матрицы, которую с учетом ее стоимости эффективно выполнять численными методами.

Моделирование НДС выполнялось для стадии установившейся деформации образца методом конечных элементов (КЭ) в системе конечно-элементного анализа ANSYS. Использовались твердотельные тетрагональные прочностные КЭ, позволяющие задавать степени свободы для узлов в виде угла поворота относительно оси. Количество КЭ в основной части модели образца составляет 20 - 25 тысяч при общем количестве КЭ порядка 30 - 40 тысяч.

Для описания модели материала, учитывая большие деформации, возникающие в образце, использовался метод задания кривой текучести материала в табличной форме в виде «деформация-напряжение», экспериментально установленной для моделируемого материала. Использовались температурно-зависимая и независимая от температуры модели материала. В первом случае выполнялся предварительный расчет теплового поля образца с учетом теплообмена между торцовыми поверхностями и контробразцом, а также между боковыми по-

верхностями и поверхностью канала с учетом смазки. При моделировании НДС образцов материал считали несжимаемым, трение о стенки канала не учитывалось, взаимное проникновение материала и оснастки исключалось.

В качестве кинематических граничных начальных условий использовались углы поворота узлов конечно-элементной модели, принадлежащих нижней и верхней торцовым плоскостям образца. Угол поворота верхней плоскости задавался равным конечному углу разворота верхнего торца образца в матрице (рис. 1а). Конечный угол разворота поперечного сечения образца является параметром, определяющим величину деформации за один цикл и может варьироваться в широких пределах.

Для исключения влияния условий закрепления образца по торцовым плоскостям, обусловленным принципом Сен-Венана, расчетная модель имела три зоны, включающие основной образец с обеих торцов, окруженный фальш-образцами (рис. 4). При такой модели формы удалось получить неискаженную картину НДС вблизи торцевых поверхностей исследуемого образца.

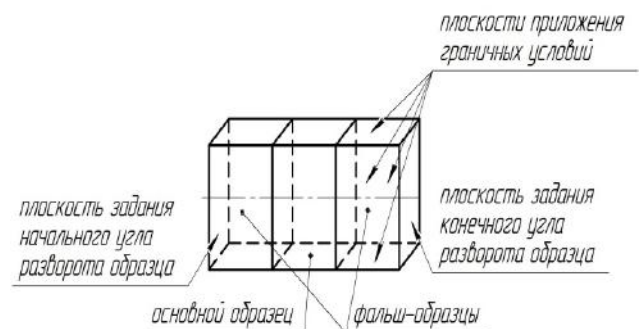


Рисунок 4 – Схема расчетной модели образца для моделирования НДС

Нагружение образца выполнялось путем задания угла поворота относительно центральной оси узлов конечных элементов, принадлежащих боковым плоскостям. Предварительные исследования различных моделей нагружения показали, что выбранная модель максимально приближена к условиям деформации образца при прохождении через винтовой канал матрицы (рис. 4).

Угол разворота винтового канала относительно центральной оси задавали в виде функции (1):

$$\alpha = f(y), \quad (1)$$

где  $\alpha$  – расчетное значение угла поворота узлов конечно-элементной модели,  $y$  – расстояние от торца закрепления образца, мм.

Зависимость (1) может принимать произвольный вид (рис. 5), что позволяет выполнять оптимизацию геометрии винтового канала по различным критериям (например, максимальной величине девиатора напряжений, максимальной деформации), а также градиентов их изменения. Для оптимизации могут быть использованы различные методы первого и второго порядков.

При моделировании в системе ANSYS функцию (1) задавали в виде полинома, удовлетворяющего

кинематическим граничным условиям, протабулированного в интервале  $L_H - L_K$ , где  $L_H, L_K$  - соответственно координаты начала и конца винтового канала в продольном направлении.

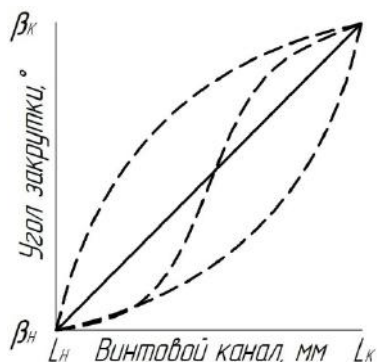


Рисунок 5 – Варианты функций нагружения образца при ВЭ:

$L_H, L_K$  – координаты начала и конца винтового канала в продольном направлении;

$\beta_H, \beta_K$  – начальный и конечный углы закрутки

Примером зависимости (1) является полином вида

$$\alpha(y) = \sum_{n=1}^N \left( \beta_H \frac{L_K - y}{L_K - L_H} + \beta_K \frac{y - L_H}{L_K - L_H} \right)^n \quad (2)$$

Расчет НДС выполнялся с учетом нелинейных эффектов, вызванных наличием больших деформаций в образце. На всех этапах моделирования использовались APDL-скрипты, позволяющие существенно упростить процедуру подготовки и получения решения.

Разработка и апробация технологии оптимизации геометрических параметров винтового канала и образцов выполнялись для призматических образцов, имеющих различное соотношение сторон. Исследовались образцы с квадратным (20x20) мм и прямоугольным (20x40) мм сечениями. Конечный угол поворота торцового сечения образца задавался равным 90°. Закон изменения угла закрутки канала – линейный. Свойства материала образца соответствуют титановому сплаву BT1-0.

Анализ распределения касательных напряжений в различных сечениях образцов при прохождении винтового канала (рис. 6), эквивалентных деформаций (рис. 7) и векторов перемещений (рис. 8) в различных сечениях образцов позволяет выполнить оценку эффективности применения рассматриваемой схемы деформации.

Максимальный уровень напряжённого состояния образцов достигается в верхней и нижней плоскостях винтового канала в периферийной части образцов (рис. 6, 7). В центральной части призматических образцов независимо от соотношения сторон наблюдается слабodeформированная область (рис. 7а, б).

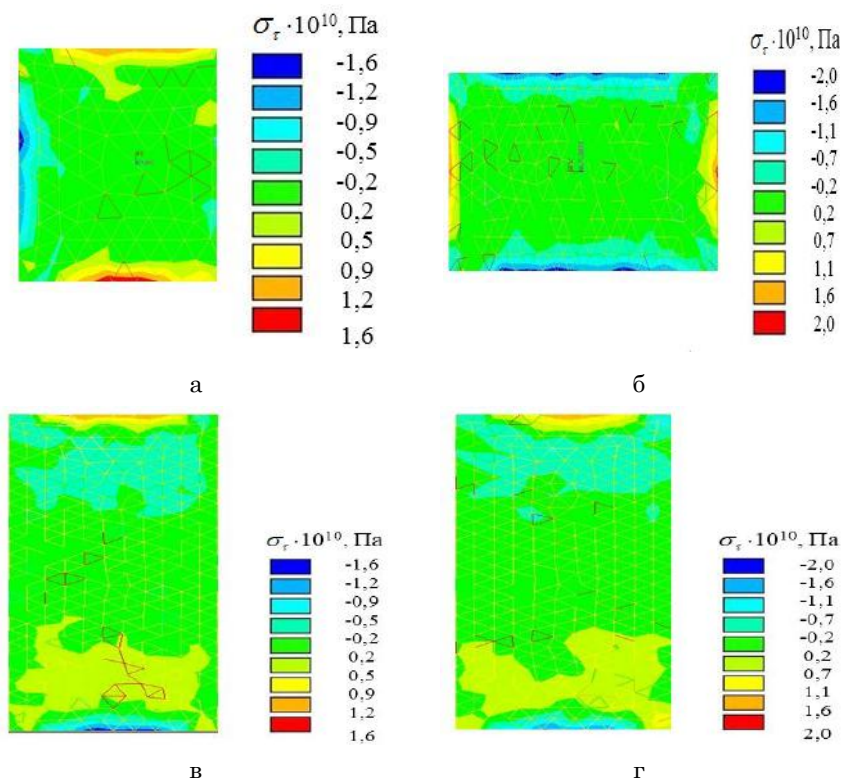


Рисунок 6 – Изолинии касательных напряжений в различных сечениях образцов: поперечное сечение образца квадратного (а) и прямоугольного (б) профилей; продольное сечение образца квадратного (в) и прямоугольного (г) профилей

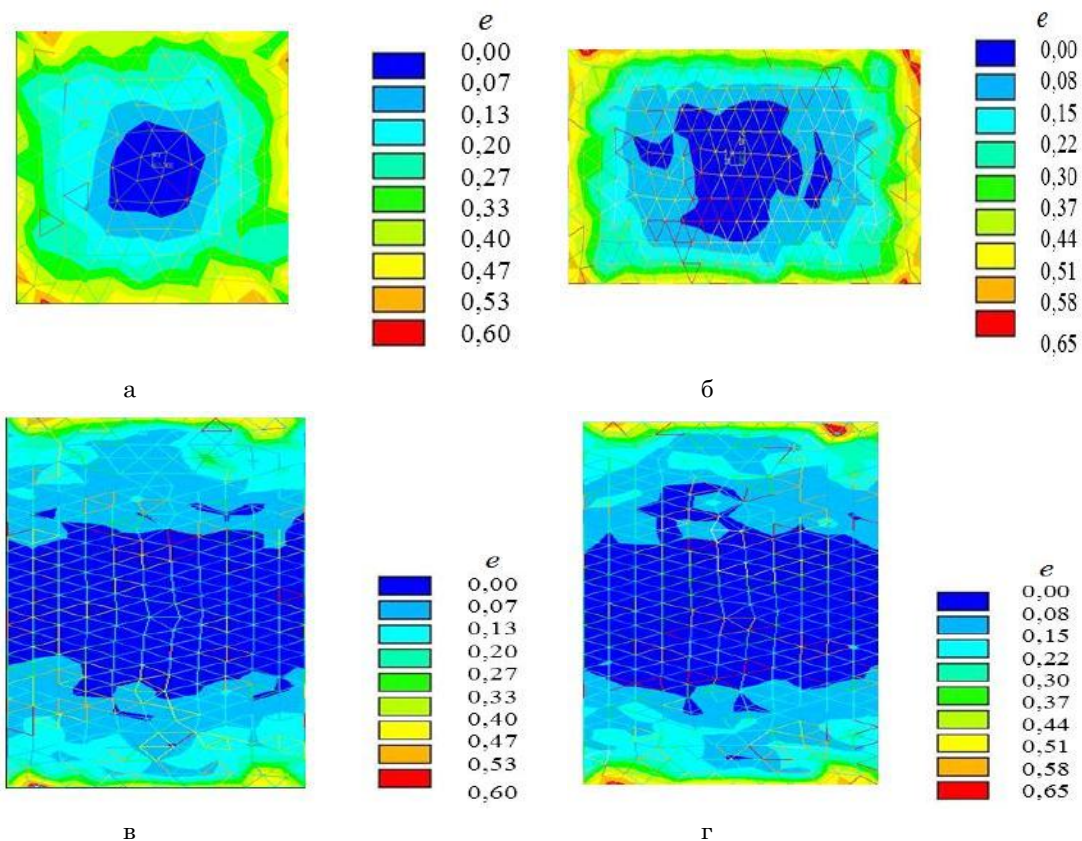


Рисунок 7 – Изолинии эквивалентных деформаций в различных сечениях образцов: поперечное сечение образца квадратного (а) и прямоугольного (б) профилей; продольное сечение образца квадратного (в) и прямоугольного (г) профилей

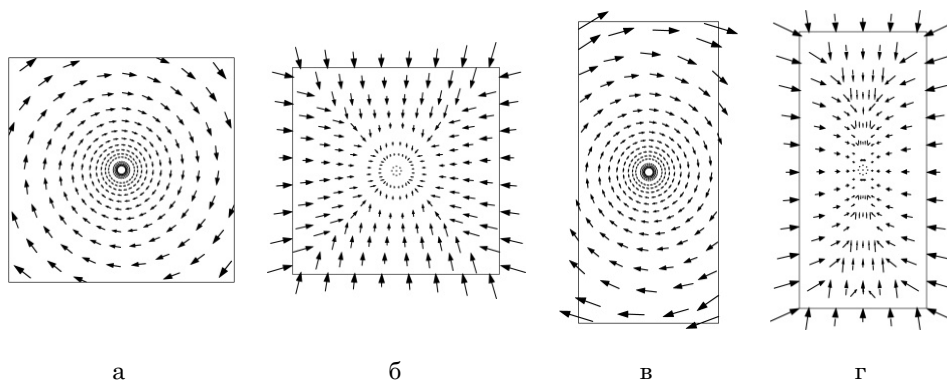


Рисунок 8 – Векторное поле перемещений точек поперечного сечения образцов с квадратным (а) и прямоугольным (б) сечениями

Наличие в центре образцов вблизи нейтральной линии зоны, в которой напряжения и деформации могут на порядок отличаться от аналогичных значений для периферийных зон, является основным недостатком экструзии призматических образцов. При этом, теоретически, степень проработки структуры материала будет различна, что способствует увеличению рассеяния величины механических свойств по сечению образцов, подверженных ВЭ. Оценка НДС образцов различного сечения численным методом позволяет выполнять оптимизацию поперечного сечения по критериям деформации центральной и периферийной зон.

Практический опыт деформации призматических образцов винтовой экструзией показывает, что при увеличении количества циклов деформации структура образцов прорабатывается по всему поперечному сечению [10], что является следствием диффузии и наличия вихрей в плоскости деформации [11, 12].

Установленное поле распределения эквивалентных деформаций по высоте винтового канала матрицы указывает на то, что максимальное значение деформации достигается на начальном и конечном участках винтового канала (рис. 9). В средней части канала происходит «перетекание» материала в пределах поперечного сечения, способствующее явлению

перемешивания структуры, что является особенно важным при деформации сложнoleгированных сплавов и порошковых образцов, обеспечивая гомогенизацию легирующих элементов по сечению образца.

Наибольшие поперечные перемещения и, следовательно, наиболее благоприятные условия для гомогенизации возникают в образце прямоугольного сечения.

Наблюдаемая осцилляция расчетных значений связана с несовпадением пути, вдоль которого определяют значения НДС с узлами КЭ. В результате на участках пути, проходящих между узлами КЭ, расчетные значения НДС определяются путем интерполяции по соседним узлам.

Для уменьшения эффекта осцилляции может быть использована конечно-элементная модель, содержащая большое количество КЭ.

Аналогичные распределения компонентов напряженного и деформированного состояний могут быть получены для произвольного сечения образцов. Результаты моделирования деформированного состояния образцов в процессе винтовой экструзии хорошо согласуются с результатами экспериментальных исследований, полученных авторами работы [7], что свидетельствует об адекватности применяемой методики численного эксперимента.

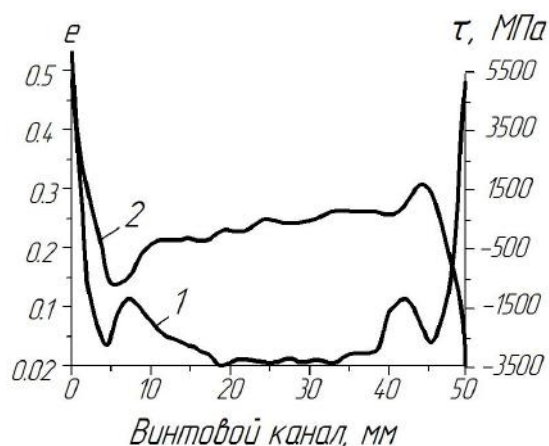


Рисунок 9 – Распределение эквивалентных деформаций (1) и касательных напряжений (2) вдоль боковой поверхности образца квадратного сечения

Результаты моделирования показали, что разработанная методика является эффективной для оптимизации параметров винтового канала при проектировании матриц для реализации процесса ИПД методом винтовой экструзии.

В результате ее применения возможно выполнение оптимизации профиля винтового канала, установление закономерностей изменения угла закрутки, а также интенсивности и абсолютной величины касательных напряжений и деформаций. При этом необходимо учитывать физические и механические свойства, закономерности деформационного упрочнения и величины напряжений, приводящие к дроблению структурных элементов конкретного сплава. Легко определяемая методом конечных элементов энергия деформации образцов может быть использована для расчета необходимого усилия деформирования с учетом сечения канала, закономерностей изменения угла закрутки вдоль винтовой линии, а также физических свойств деформируемых материалов. Результаты моделирования позволяют также определять степень предварительной деформации заготовок деталей, изготавливаемых из деформированных винтовой экструзией полуфабрикатов, в зависимости от места их вырезки, что необходимо учитывать при их дальнейшей обработке.

Перспективами дальнейших исследований в направлении совершенствования разработанной методики являются работы, направленные на установление оптимальных с точки зрения энергосиловых параметров закономерностей угла закрутки винтового канала и геометрии образцов.

## Optimization technique of the matrix channel for twist extrusion

D. V. Pavlenko<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Zaporizhzhya National Technical University, 64, Zhukovskogo Str., Zaporizhia, Ukraine, 69063

Submicrocrystalline formation condition in billets of metals and their alloys is possible by intensive plastic deformation (IPD) by twist extrusion. Successful implementation of IPD for alloys of different classes can be set at the optimum combination of process parameters. Attempts to implement IPD prismatic billets made of titanium alloys empirically often led to the blanks destruction or inadequate level of fragmentation patterns. The purpose was to develop and test methods of numerical modeling of the stress-strain state of billets during IPD twist extrusion.

Developed technology describes the basic steps of the numerical simulation state blanks depending on important parameters such as the geometry of the preform and the amount of back pressure of the screw channel twist law, and others. Its implementation allows to set the operating parameters of the process in which there is a uniform structure throughout the fragmentation amount of timber without destroying it. Determined by the energy required to implement IPD billets depending on their geometry, temperature,

geometry of the screw channel and a number of process parameters, can count on the need to strengthen the stem press. The simulation results allow to determine the degree of pre-strain for parts made from deformed screw extrusion billets, depending on their place of scraps given the uneven deformation of the cross section of prismatic billets. On the example of blanks square and rectangular cross-section shows the distribution of the shear and equivalent stresses along the screw channel in different sections. The results of modeling the fields of stress and strain distributions in different sections of the billets are obtained. Thus, modeling method in conjunction with the methods of experimental design and optimization of the objective functions was developed, enables the optimization of operating parameters of IPD pieces of metallic materials in order to obtain submicrocrystalline structure.

**Keywords:** intensive plastic deformation, twist extrusion, finite element method, submicrocrystalline.

## Методика оптимізації каналу матриць для гвинтової екструзії

Д. В. Павленко<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> *Запорізький національний технічний університет, вул. Жуковського, 64, м. Запоріжжя, Україна, 69063*

Розглянуто методику визначення напружено-деформованого стану зразка, підданого інтенсивній пластичній деформації методом гвинтової екструзії. Показана можливість використання методу кінцевих елементів для оптимізації технологічного оснащення під час реалізації процесу гвинтової екструзії.

Результати моделювання показали, що розроблена методика є ефективною для оптимізації параметрів гвинтового каналу під час проектування матриць для реалізації процесу ПД методом гвинтової екструзії. Внаслідок її застосування можливі виконання оптимізації профілю гвинтового каналу, встановлення закономірностей зміни кута закрутки, а також інтенсивності та абсолютної величини дотичних напружень і деформацій.

**Ключові слова:** інтенсивна пластична деформація, гвинтова екструзія, метод кінцевих елементів, субмікрокристалічна структура.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бейгельзимер Я. Е. Винтовая экструзия – процесс накопления деформации / Я. Е. Бейгельзимер, В. Н. Варюхин, Д. В. Орлов. – Донецк : ТЕАН, 2003. – 87 с.
2. Ткач Д. В. Особенности структуры и разрушения титана марки VT1-0 в субмикроструктурном состоянии при циклическом нагружении / Д. В. Ткач, Д. В. Павленко, В. Е. Ольшанецкий // Новые материалы и технологии в металлургии и машиностроении. – 2011. - № 1. – С. 11–18.
3. Валиев Р. З. Объемные наноструктурные металлические материалы: получение, структура и свойства / Р. З. Валиев, И. В. Александров – М.: Академкнига, 2007. – 397 с.
4. Beygelzimer Y. Useful properties of twist extrusion / Y. Beygelzimer, V. Varyukhin, S. Synkov, D. Orlov // Materials Science and Engineering – A 503 (2009). - P. 14–17.
5. Утяшев Ф. З. Деформационные методы получения наноструктурированных материалов и возможности их использования в авиадвигателестроении / Ф. З. Утяшев // Авиационно-космическая техника и технология. – 2009. □ № 10 (67). □ С. 7 – 11.
6. Павленко Д. В. Применение винтовой экструзии для получения субмикроструктурной структуры и гомогенизации титанового сплава VT3-1 / Д. В. Павленко, А. В. Овчинников, А. Я. Качан и др. // Вестник двигателестроения. – 2007. – № 2. – С. 185 – 188.
7. Beygelzimer Y. Kinematics of metal flow during twist extrusion investigated with a new experimental method / Y. Beygelzimer, A. Reshetov, S. Synkov, O. Prokofeva, R. Kulagin // Journal of materials processing technology. – 2009 (2009). – P. 3650 – 3656.
8. Павленко Д. В. Получение деформированных заготовок из титановых сплавов на основе методов порошковой металлургии / Д. В. Павленко, А. В. Овчинников, А. Е. Капустян, А. А. Скребцов // Титан. – 2013. – № 1. – С. 24 – 32.
9. Павленко Д. В. Материаловедческие аспекты ресурсосберегающей технологии получения титановых полуфабрикатов / Д. В. Павленко // Технологические системы. – 2013. – № 4(65) – С. 21 – 29.
10. Ольшанецкий В. Е. Деформационное поведение титана VT1-0 с субмикроструктурной структурой, полученной методом винтовой экструзии / В. Е. Ольшанецкий, Л. П. Степанова, В. Л. Грешта и др. // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2013. – № 11. □ С. 29 – 33.
11. Beygelzimer Y., Lavrinenko N. Perfect plasticity of metals under simple shear as the result of percolation transition on grain boundaries [Электронный ресурс] / Y. Beygelzimer, N. Lavrinenko Режим доступа: <http://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1206/1206.5055.pdf>
12. Beygelzimer Y. Twist extrusions plus spread extrusion = spatial uniformity / Y. Beygelzimer, A. Reshetov // Ultrafine Grained Materials. – 2006. – № 4. - P. 119 – 124.

## REFERENCES

1. Bejgel'zimer Ja. E. Vintovaja jekstruzija – process nakoplenija deformacii / Ja. E. Bejgel'zimer, V. N. Varjuhin, D. V. Orlov. – Doneck : TEAN, 2003. – 87 s.
2. Tkach D. V. Osobennosti struktury i razrushenija titana marki VT1-0 v submikrokristallicheskom sostojanii pri ciklicheskom nagruzenii / D. V. Tkach, D. V. Pavlenko, V. E. Ol'shanec'kij // Novye materialy i

tehnologii v metallurgii i mashinostroenii. – 2011. №1. – S. 11–18.

3. Valiev R.Z. Ob'emnye nanostrukturnye metallicheskie materialy: poluchenie, struktura i svojstva / R.Z. Valiev, I.V. Aleksandrov – M.: Akademkniga, 2007. – 397 s.

4. Beygelzimer Y. Useful properties of twist extrusion / Y. Beygelzimer, V. Varyukhin, S. Synkov, D. Orlov // *Materials Science and Engineering –A* 503 (2009). □ R. 14 – 17.

5. Utjashev F.Z. Deformacionnye metody poluchenija nanostrukturirovannyh materialov i vozmozhnosti ih ispol'zovanija v aviadvigatelistroenii / F.Z. Utjashev // *Aviacionno-kosmicheskaja tehnika i tehnologija*. – 2009. – № 10 (67). – S. 7–11.

6. Pavlenko D.V. Primenenie vintovoj jekstruzii dlja poluchenija submikrokristallicheskoj struktury i gomogenizacii titanovogo splava VT3-1 / D.V. Pavlenko, A.V. Ovchinnikov, A.Ja. Kachan i dr. // *Vestnik dvigatelestroenija*. – 2007. – №2. – S. 185 – 188.

7. Beygelzimer Y., Kinematics of metal flow during twist extrusion investigated with a new experimental method / Y. Beygelzimer, A. Reshetov, S. Synkov, O. Prokof'eva, R. Kulagin // *Journal of materials processing technology*. – 2009. – R. 3650 – 3656

8. Pavlenko D.V. Poluchenie deformirovannyh zagotovok iz titanovyh splavov na osnove metodov poroshkovoj metallurgii / D. V. Pavlenko, A.V. Ovchinnikov, A.E. Kapustjan, A.A. Skrebcov // *Titan*. –2013. – №1. – S. 24 – 32.

9. Pavlenko D.V. Materialovedcheskie aspekty resursoberegajushhej tehnologii poluchenija titanovyh polufabrikatov / D.V. Pavlenko // *Tehnologicheskie sistemy*. – 2013. – №4(65) – S. 21 – 29.

10. Ol'shaneckij V.E. Deformacionnoe povedenie titana VT1-0 s submikrokristallicheskoj strukturoj, poluchennoj metodom vintovoj jekstruzii / V. E. Ol'shaneckij, L. P. Stepanova, V. L. Gresha i dr. // *Metallovedenie i termicheskaja obrabotka metallov*. – 2013. – №11. □ S. 29 – 33.

11. Beygelzimer Y., Natalia Lavrinenko Perfect plasticity of metals under simple shear as the result of percolation transition on grain boundaries [Elektronnyj resurs] / Y. Beygelzimer, N. Lavrinenko Rezhim dostupa: <http://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1206/1206.5055.pdf>

12. Beygelzimer Y. Twist extrusions plus spread extrusion = spatial uniformity / Y. Beygelzimer, A. Reshetov // *Ultrafine Grained Materials*. – 2006. – №4 □ P. 119 – 124.



## The Principles of Creation the System of Programmed Control of the electric drive billet shears

Boris Poliakov<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Russian vocational-pedagogical University in the city of Ekaterinburg (Russia), 11, Mashinostroitelei street, Yekaterinburg, Russia, 620012

### Article info:

Paper received:

16 May 2015

The final version of the paper received:

05 November 2015

Paper accepted online:

30 November 2015

### Correspondent Author's Address:

<sup>1)</sup> bpoliakov@hotmail.com

Principles of creation a microprocessor system of programmed control by the electric drive of billet shears of billet rolling mills, which provides a significant reduction of the power consumption and decrease of the load capacity of the equipment are offered; mathematical modeling proves informatively-control parameters of the system and its efficiency is proved; the variant of implementation of principles is adduced.

**Keywords:** billet shears, electric drive, rolling mills, microprocessor system of programmed control, mathematical modeling.

## INTRODUCTION

The invention relates to rolling equipment and may be used in the development and the employment of sheet and section shears for hot rolling shops.

It is an object of this invention to provide the electric energy saving, the reduction of the loading degree of the mechanical and electrical parts of shears and the increasing their life with minimum investment used.

The previously known shears drive control system forms usually a rectangular current diagram with constant maximum allowable acceleration and deceleration values.

The present invention is characterized in that the suggested shears drive control system forms within the acceleration and deceleration period and at cutting a loading diagram on the basis of the principle of maximum use of the accumulated kinetic energy amount that well exceeds the level necessary for performing the cutting; the characteristics of the loading diagram being differentially taken in accordance with the cross section height and the mechanical properties of the billet metal being cut.

## MAIN BODY

Shears electrical drive control method [1].

The invention relates to rolling equipment and may be used in the development and the employment of sheet and section shears for hot rolling shops.

Known in the prior art is the control method of shears electric drive including a convertor, a d.c. motor and a control system; this process provides the adjustment of the motor armature voltage to achieve thereby "the most rational constant maximum allowable acceleration and deceleration values having a rectangular current diagram" [2].

The disadvantage of the existing control method is that the control is fully based on the adjustment of the voltage supplied to motor armature; the characteristics of loading diagram (armature current time variation) and tachogram (time variation of armature voltage or armature rotation frequency), that is the maximum current value and the current duration within acceleration and deceleration periods, the maximum current limitation value (cutting - off value) at cutting, are being constant. Thus a rather wide range of heights of billet being cut, steel grades and respective technological loading are not considered. Therefore energy consumption and loading degree of equipment is not reasonable since the drive control system characteristics for small billets of carbon or low-carbon steel, having low height, small cross section area and low specific cutting resistance, and those for large billets of high-alloy and hard-to-deform grades of steel are the same.

The object of the present invention is the electric energy saving, the reduction of loading degree of the mechanical and electrical parts of equipment and increasing the life with the minimum investment used.

This object is accomplished by using at acceleration and deceleration periods the current diagram approximated as much as possible to linear one that is considered to be optimal from the viewpoint of motor heating and electric energy consumption. The diagram characteristics such as the maximum current value and the current duration are differentially taken directly proportional to the height of the billets being cut, and at cutting the armature current limitation (cutting-off) is taken place according to the armature current value being directly proportional to the mechanical properties of the steel being cut that is the specific resistance to cutting.

The linear diagram is reasonable due to the fact that the amount of the kinetic energy accumulated by the cutting mechanism and the motor or the redaction



gear (if a geared drive is used) exceeds at least 2.5-3 times the minimum energy level which is reposed to perform the cutting. Therefore it is not necessary trying to achieve a rectangular current diagram and consequently the higher armature rotation frequency, that is the higher energy accumulation level resulting in the increasing of the degree of the equipment loading, excessive energy consumption and motor heating. The use of the differential current limitation at cutting depending on the mechanical properties of the billet metal is also reasonable due to the great amount of the kinetic energy accumulated by the cutting mechanism to the moment of cutting, that is the energy of the mechanism rotating masses (identically to the flywheel) is well enough for the performance of process cutting, the additional motor energy being not necessary.

Thus the present invention is characterized in that taking into account the fact that the amount of the kinetic energy accumulated by the drive mechanism well exceeds the amount required for cutting to perform it is suggested to form the loading diagram for the drive considering the minimum loading degree of the mechanical and electrical part of equipment as well as the minimum energy consumption, the characteristics of the diagram being differentially [3] taken in accordance with the sizes and the with steels grades of the billets being cut.

Fig. 1 shows the known and the suggested loading diagrams and tachograms formed within the acceleration period and at cutting, where:

$J_{max}$  is the maximum current amount at the acceleration (deceleration) period;

$\Delta t$  is the maximum current duration at the acceleration (deceleration) period;

$J_{cut-off}$  is the current limitation value at cutting (current cutting-off value);

“U” is the motor armature voltage variation; “n” is the motor armature rotation frequency.

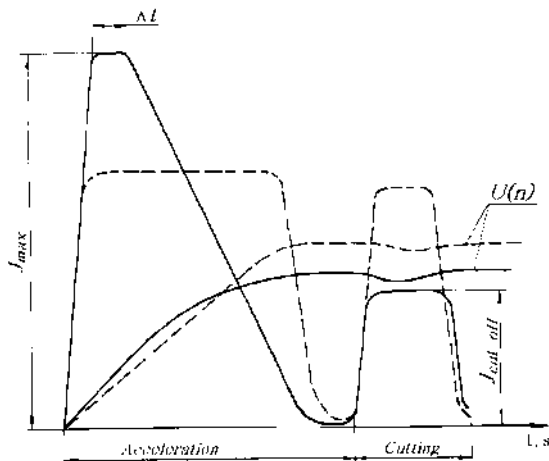


Fig. 1 Existing (-----) and suggested (——) shears electric drive control method. U(n)- variation of voltage (U) or rotation frequency (n) of motor armature.

Fig. 2 and 3 show the proportion dependence of billet height, maximum current value and current duration especially with in the acceleration period, as

well as the mechanical properties of billet metal (maximum specific resistance to cutting value -  $\tau_{max}$ ) at cutting temperature and cutting-off current value.

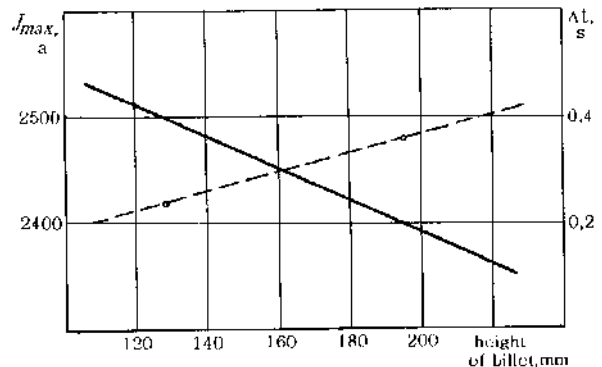


Fig. 2 Rational control points current diagram during acceleration and deceleration depending on height of cross section of cutting billets.  $J_{max}$  (—)-maximum current value during acceleration/deceleration,  $\Delta t$  (---)-its length.

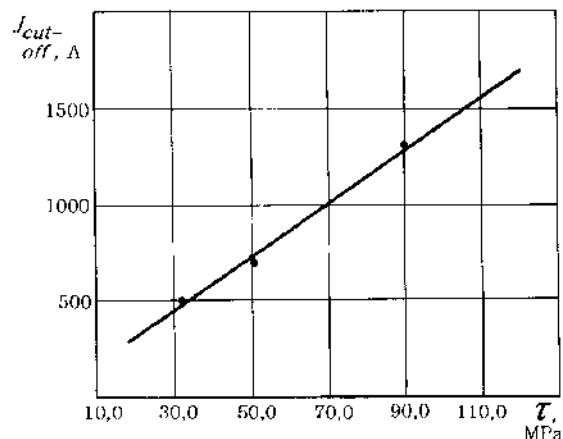


Fig. 3 Rational control points current cut-off ( $J_{cut-off}$ ) diagram during cutting depending on value specific resistance to cutting of hot metal ( $\tau$ ).

Example:

The drive of “Sack”-type section shears installed in 850 blooming mill line at Jzhevsk metallurgical plant (Russia) has the following characteristics: d.c. motor of the type MIIC640-700J; electric drive shaft total moment of inertia is 13.3 kgf.m.S2, reduction year ratio is 74.

The above table shows comparative data of computer mathematical modeling of the cutting process for the billet having cross section 195x390mm made of steel 38X2MIOA\*\* ( $\tau_{max} = 31.8$  MPa), this billet size being the main one in a size range for the shears with the known and the suggested drive control methods.

\*\* The steel of mark 38X2MIOA (where X-Cr, M-Mo, IO-Al, A- is the high-quality steel alloyed with aluminum) have chemical composition (in %): C[0.35-0.42]; Mn[0.3-0.6]; Si[0.2-0.45]; Cr[1.35-1.65]; Ni[0.7-1.1]; Mo[0.15-0.25].

Comparative data of mathematical modelling of cutting process with known and suggested methods of management

Control method	$J_{max}$ at acceleration (deceleration), A	$\Delta t$ , s	J At cutting, A	n, r.p. m	Total kinetik energy amount at the begging of cutting, kN.m	Motor heat- ing, ratio* Jav.sq/Jnom	Energy consumption, kwn.r		Cut- ting force, kN
							At accelera- tion	At cutting	
Known	1950	1.1	1450	974	700	0.78	0.22	0.1	2434
Suggested	2400	0.4	500	865	550	0.75	0.18	0.05	2340

\* Jav.sq - average square-law value of a current ( or heating) and Jnom - the nominal moment of the electric motor.

The above data prove that the control method according to the present invention provides the reduction of the motor heating, the energy saving within acceleration period (more than 18%) and within deceleration period (2 times) as well as the reduction of the equipment loading degree (f.i. cutting force), while the kinetic energy level of the drive by the moment of beginning cutting is much lower (about 1.27 times) but well snout ( 208 kN.t.m ) for cutting to perform.

Technical economical efficiency of the control method according to the present invention is in that it provides the reduction of the drive energy consumption at cutting, the reduction of the motor heating and the equipment loading degree and thus the increasing of the equipment life. The economical efficiency is determined only by the reduction of the energy consumption at cutting. The Jzhevsk metallurgical plant blooming mill shears is considered as main unit for making comparison. At an yearly working time amount of 7000 hours the number of cuts is 1.68x106.

According to the above table data the reduction of the total energy consumption at cutting of 195x390 billet of steel 38X2MIOA is  $2(0.22-0.18)+(0.1-0.05)=0.13$  kWh.r per one cut. If the size range for the shears is based on the 195x390 billet size only, the yearly energy saving achieved by using the control method according to the present invention is -  $\Theta = 1.68 \times 106 \times 0.13 = 0.218$  Mkw.h.r.

### CONCLUSION (CLAIMS)

1. A control method for the electric shears drive including a converter, a d.c. motor and a control system providing the adjustment by varying motor armature current or motor armature voltage and making within the acceleration and deceleration period a current diagram maximum approximated to the linear one, which process is characterized in that the maximum current value at acceleration is varying inversely proportional and current duration directly proportional to the height of a billet being cut to achieve thereby the electric energy saving, the reduction of the loading degree of the

mechanical and electrical parts of the equipment and increasing their life time.

2. A control method according to claim 1 characterized in that to achieve the maximum use of the mechanism kinetic energy at cutting as well as the electric energy saving the current limitation ( current cutting-off ) is applied in cutting period, the value of the current being varied directly proportional to the mechanical properties (specific resistance cutting) of the steel being cut.

To realize an offered control method of a drive of shears is possible in real conditions of manufacture, input of the microprocessor in the closed contour of system of regulation by the electric motor. At the initial stage the system should be under construction as semi-automatic (admitting actions of the operator), with manual input of the initial information: the area (or height) sections of billet and model of steel (  $\tau$  ) and managing parameters-  $I_{max}$ ,  $\Delta t$  and  $I_{cut-off}$ .

But presence of the microprocessor allows to realize in further more flexible, adaptive variant of program management: keeping in memory mathematical model of the mechanism and system of regulation by a drive, is possible to define and correct parameters and control points not on average to the dependences, shown on Fig. 2 and 3, and in view of real results of process of cutting and possible deviations in initial parameters ( for example, the lowered temperature of billet ).

In the conclusion, I think necessary to thank my daughter-Ekaterina B.Poliakova-Georgantas (PhD), as the direct participant of preparation of the given article, performed laborious and complex work on translation into English language of the labor-intensive technical text.

Information presented with the purpose of search metallurgical or machine-building plant-customer, interested in economy electrical energy and increase period's work technological equipment which do service in organization and financial support in elaboration and realization of this project.

### Принципи побудови системи програмного керування електроприводом сортових ножиць

Б. Н. Поляков<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Російський державний професійно-педагогічний університет, вул. Машинобудівників, 11, м. Єкатеринбург, Свердловська область, Російська Федерація, 620012

У роботі пропонуються принципи створення мікропроцесорної системи програмного керування електроприводом сортових ножиць заготовочних прокатних станів, що забезпечує значне скорочення витрат електроенергії і зниження завантаженості обладнання. Математичним моделюванням автор

обґрунтовує інформаційно-керуючі параметри системи та доводить її ефективність; наводиться варіант реалізації принципів.

**Ключові слова:** сортові ножиці, електропривід, прокатні стани, мікропроцесорні системи програмного керування, математичне моделювання.

## Принципы построения системы программного управления электроприводом сортовых ножниц

Б. Н. Поляков<sup>1)</sup>

- <sup>1)</sup> Российский государственный профессионально-педагогический университет, ул. Машиностроителей, 11, г. Екатеринбург, Свердловская область, Российская Федерация, 620012

В статье предлагаются принципы создания микропроцессорной системы программного управления электроприводом сортовых ножниц заготовочных прокатных станов, обеспечивающей значительное сокращение расхода электроэнергии и снижение нагруженности оборудования. Автор обосновывается математическим моделированием информационно – управляющие параметры системы и доказываются её эффективность; приводится вариант реализации принципов.

**Ключевые слова:** сортовые ножницы, электропривод, прокатные станы, микропроцессорные системы программного управления, математическое моделирование.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Поляков Б. Н. и другие. Способ управления электроприводом ножниц. Заявка 4444608/27 - 94448/МКУ4В23 – D25/00 от 20.06.88.
2. Слежановский О. В. Реверсивный электропривод постоянного тока. – Москва : Металлургия, 1967. – 324 с.
3. Поляков Б. Н. и другие. Способ разделения горячего проката. А. с. 168055 СССР, В23D15/10, заявл. 31.03.89 ; опубл. 07.10.91, Бюл. № 37.

### REFERENCES

1. Poliakov B. N. and others. Shears electrical drive control method. Application for supposed invention N4444608/27 - 94448/МКУ4В23 - D25/00 from 20.06.88.
2. Slezhanovskii O. V. Reversible d.c. electric drive", publishing house: Metallurg, 1967, p. 324.
3. Poliakov B. N. and others. Method division hot rolled metal. Author's certificate 1682055 USSR, B23D15/10. Application from 31.03.89; Publish 07.10.91, Bulletin N 37.



## Возможный механизм действия геоактиваторов трения в трибосопряжениях деталей машин

В. А. Козечко<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> ДВНЗ «Национальный горный университет», просп. К. Маркса, 19, Днепрпетровск, Украина, 49000

### Article info:

Paper received:

23 May 2015

The final version of the paper received:

16 October 2015

Paper accepted online:

30 November 2015

### Correspondent Author's Address:

<sup>1)</sup> kozechko@list.ru

В работе показан новый метод восстановления взаимодействующих узлов с использованием геоактиваторов трения. Данный способ позволяет снизить износ поверхности, а также восстановить функциональное состояние изношенных поверхностей без прекращения эксплуатации механизмов. В основу разработки положены идеи использования геоактиваторов нового поколения и управления процессами, происходящими в зоне контакта пар трения для повышения износостойкости и долговечности машин и механизмов. Установлено, что механизм действия заключается в направленной ионной диффузии компонентов специального трибологического состава. Исследования основаны на выборе состава трибологических материалов, определении физико-химических характеристик геоактиваторов, использовании вычислительной техники, испытательных машин и оборудования, приспособлений для контроля процессов трения и износа, проведении современного металлофизического анализа и аналитико-статистической обработки экспериментальных данных.

Проведены экспериментальные исследования механизма взаимодействия геоактиваторов с разными конструкционными материалами в условиях трения, которые включали анализ повреждений узлов и деталей горно-металлургического оборудования при их контактном взаимодействии; анализ химического состава порошковых материалов, используемых для изготовления геоактиваторов; металлографические исследования поверхностей трения при использовании геоактиваторов; исследование влияния геомодификаторов на механические и эксплуатационные свойства материалов.

Исследования трущихся поверхностей после обработки геоактиватором показали, что компоненты геоактиватора диффундируют в поверхностные слои материала и образуют стеклокристаллические слои, представляющие собой растворы компонентов геоактиватора в фазовых составляющих сталей и чугунов поверхности. Исследования механических свойств показали, что твердость и износостойкость поверхностного слоя увеличивается, а шероховатость контактирующих поверхностей снижается.

**Ключевые слова:** реновация поверхности, пара трения, шероховатость, износостойкость, твердость, силикаты.

## ВВЕДЕНИЕ

Существенным препятствием повышения долговечности машин и механизмов является износ их узлов в процессе трения. Масштаб убытка вследствие износа и значение проблемы повышения износостойкости и долговечности машин могут быть охарактеризованы следующими цифрами: из-за износа узлов деталей происходит 80 - 90 % отказов машин, а потери средств в машиностроении достигают 5 % национального дохода [1, 2, 3].

## ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Цель работы – исследование влияния геоактиваторов трения и его состава на коэффициент трения и функциональное состояние поверхности трущихся деталей.

Геоактиватор представляет собою порошковый материал, изготовленный на базе отечественного

природного материала – серпентинита, который в своем составе содержит большое количество химических элементов однако основной вес приходится на Mg ( $\approx 23$  %), Si (18 – 21 %) и их оксиды SiO<sub>2</sub> (33,4 – 44,5 %) и MgO (25,6 – 38,0 %). В процессах, происходящих в трибосопряжениях, главную роль играют силикаты – солеобразные химические соединения, содержащие кремнезем SiO<sub>2</sub>.

В основе силикатов с мелкими катионами лежит тетраэдрическая ортогруппа. В составе геоактиваторов находятся силикаты магния в различных формах с общей формулой nMgO mSiO<sub>2</sub> или с учетом замещения Mg<sup>2+</sup> ↔ Fe<sup>2+</sup> (3Mg<sup>2+</sup> ↔ 2Fe<sup>3+</sup>), (Mg, Fe)<sub>2</sub>[SiO<sub>4</sub>]. На рис 2. представлена диаграмма состояния MgO - SiO<sub>2</sub>, отражающая зависимость структуры магний-силикатных соединений от их состава и температуры.

Эти силикаты могут образовывать твердые растворы ограниченной и неограниченной растворимости как результат замещений катионов решетки

$Mg^{2+}$  другими катионами, занимающими сходные места в упаковке из крупных ионов  $O^{2-}$ . Возможно также замещение катионов  $Mg^{2+}$  на катионы с большей валентностью ( $Al^{3+}$ ,  $Fe^{3+}$ ) с возникновением катионных вакансий. Вакансии, искажения в решетках от различий ионных радиусов взаимно замещаемых катионов, расположение части последних в междоузлиях решеток, дислокации представляют собой дефекты решеток силикатов, которые могут изменять скорость диффузии, ускорять химические реакции, увеличивать спекаемость и другие физико-химические характеристики. [3]

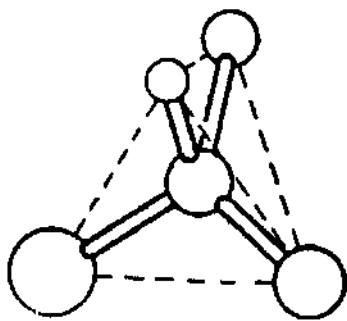


Рисунок 1 – Тетраэдрическая ортогруппа  $SiO_4$

Природные силикаты, входящие в состав геоактиваторов, содержат в той или иной мере все возможные фазы. Из них основными являются существующие в районе 50 % концентрации форстерит и энстатит, которые, как видно из диаграммы (рис. 2), присутствуют и при других концентрациях в качестве одной из составляющих.

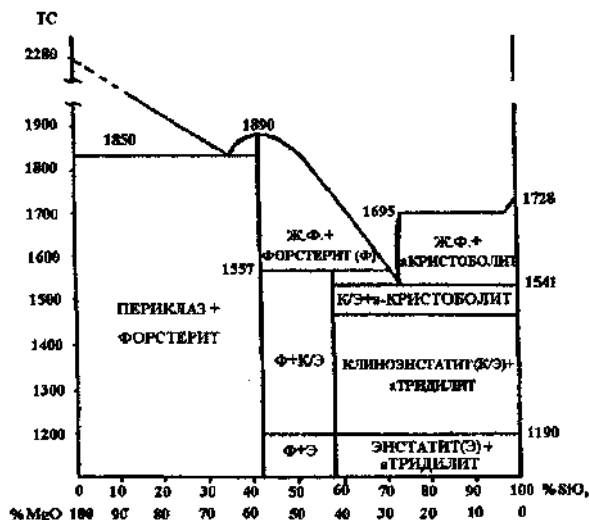


Рисунок 2 – Диаграмма состояния системы  $MgO - SiO_2$

Форстерит имеет ромбическую кристаллическую решетку с параметрами  $a = 4,770 \text{ \AA}$ ,  $b = 10,260 \text{ \AA}$ ,  $c = 5,990 \text{ \AA}$ . Форстерит устойчив во всем диапазоне температур, имеет твердость 7 единиц по шкале Мооса. Наиболее важным свойством форстерита

является способность к образованию твердых растворов.

Энстатит имеет структуру, состоящую из бесконечных цепочек различных типов с общей формулой  $Mg_2[Si_2O_6]$ . Энстатит имеет две полиморфные формы – энстатит и клиноэнстатит.

В структуре основных конструкционных материалов – сталей и чугунов - согласно диаграмме состояния  $Fe - C$  ( $Fe - Fe_3C$ ) практически при любых концентрациях углерод присутствует в виде цементита (химическое соединение –  $Fe_3C$ ). При содержании углерода, меньшем или равном 0,8 %, цементит входит в состав перлита, при содержании углерода более 0,8 % - цементит наблюдается так же в свободном виде.

На рис. 3 представлена кристаллическая решетка цементита. Цементит обладает ромбической кристаллической решеткой со следующими параметрами:  $a = 5,077 \text{ \AA}$ ,  $b = 6,776 \text{ \AA}$ ,  $c = 4,515 \text{ \AA}$ .

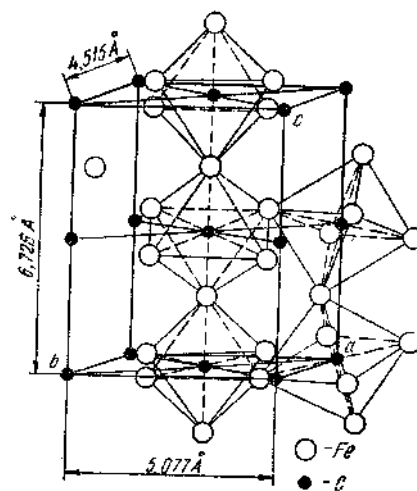


Рисунок 3 – Кристаллическая решетка цементита

Сравнение параметров кристаллических решеток цементита и форстерита (табл. 1) показало практически полное совпадение параметров по двум координатным осям. [4]

Таблица 1 – Параметры кристаллических решеток цементита и форстерита

	Величина параметра, $\text{ \AA}$		
Форстерит	$a = 4,770$	$b = 10,260$	$c = 5,990$
Цементит	$c = 4,515$	$2 a = 10,154$	$b = 6,726$
Разность параметров	0,255	0,106	0,736
Разность параметров, %	5	1	11

Частицы геоактиватора, попавшие со смазкой в зону трения, подвергаются воздействию контактного давления, которое в микрообъеме пятна контакта может достигать давления до 1000 МПа. В результате этого происходит процесс разрушения кристаллов геоактиватора и образование активных радикалов. Близость параметров кристаллических решеток цементита и форстерита позволяет образовываться на поверхности стали силикатным соединениям без

В

существенного искажения их кристаллических решеток, что очень важно для прохождения диффузионных процессов.

Одновременно с этим кристаллы геоактиватора, имеющие более высокую твердость, чем материал детали, производят микрошлифование поверхностей трения и удаление окисных пленок, а именно происходит подготовка контактирующих поверхностей к процессу обработки геоактиватором, в это же время происходят уменьшение шероховатости поверхности и ее активация.

Под действием контактных нагрузок (на уровне предела текучести материалов) происходит также замещение катионов Mg в кристаллах геоактиватора на катионы Fe с образованием твердых растворов. В результате прохождения этих процессов на поверхности трения образуется стеклокристаллический слой, прочно связанный с поверхностью детали, состоящий из различных по структуре соединений (от бесконечных слоев и цепочек до аморфной фазы), связанных между собой и способных к дальнейшим фазовым превращениям.

Этот процесс продолжается до тех пор, пока вся поверхность металла не будет насыщена геоактиватором. Процесс заканчивается образованием стабильной кристаллической структуры поверхностного слоя и прилегающих к поверхности слоев металла. Завершение процесса насыщения поверхности геоактиватором сопровождается резким снижением коэффициента трения и температуры узла трения.

Таким образом, процессы, происходящие в зоне трения при обработке геоактиватором, можно разделить на четыре этапа:

- активация поверхности;
- абсорбция геоактиватора поверхностными слоями металла;
- диффузия геоактиватора из поверхностного слоя вглубь металла;
- восстановление трущихся поверхностей с уменьшением шероховатости [5].

Проведено исследование химического состава трущихся поверхностей после обработки геоактиватором на протяжении 15, 20 и 40 часов бесперебойной работы. Для исследования были изготовлены металлографические косые шлифы.

Исследование химического состава трущихся поверхностей после обработки геоактиватором показали, что компоненты геоактиватора диффундируют в поверхностные слои материала и образуют стеклокристаллические слои, представляющие собой растворы компонентов геоактиватора в фазовых составляющих сталей и чугунов. Глубина проникновения составляет 0,1 - 0,2 мм.

Были исследованы механические свойства контактирующих поверхностей: микротвердость, шероховатость, износостойкость. Измерение микротвердости производили на приборе ПМТ-3 по ГОСТ 9450-76 под нагрузкой 50 и 100 г. Исследование микротвердости обработанных геоактиватором поверхностей металла на различной глубине позволило установить определенную зависимость. Твердость поверхностного слоя, выявляющегося на микрошлифе в виде светлой полосы, отличается от исходной твердости обрабатываемого материала, и, как правило, значительно превышает ее (рис. 4). На глубине по-

рядка 0,2 мм и более микротвердость металла сравнивается с исходной твердостью металла.

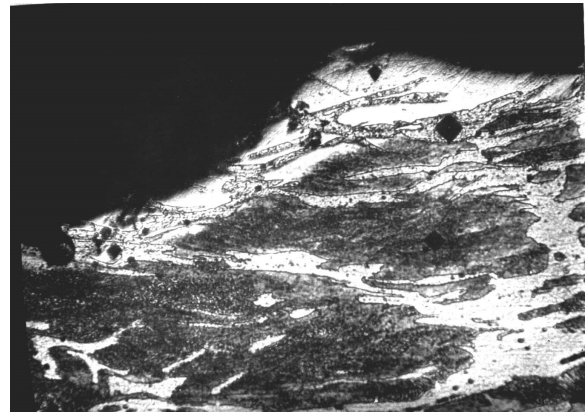


Рисунок 4 – Микроструктура поверхностных слоев с отпечатками алмазной пирамиды, х 300

Это видно по кривым зависимости значений микротвердости от глубины слоя, представленных на рис. 5. Рассмотрение этих кривых показывает, что максимальное повышение твердости относится к той глубине (до 0,04 мм), где кончается нижняя часть модифицированного слоя и начинается подповерхностный слой.

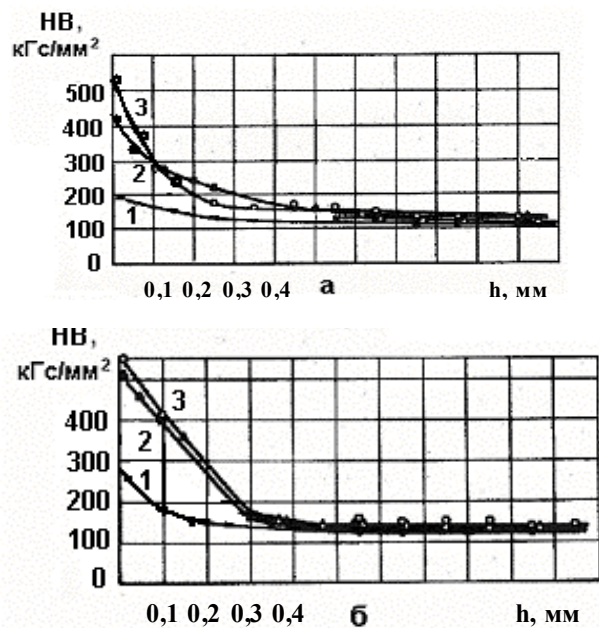


Рисунок 5 – Зависимость значения микротвердости от глубины слоя: а – сталь 45; б – сталь 40ХН; 1 – испытания без геоактиваторов; 2 – испытания с геоактиватором № 1; 3 – испытания с геоактиватором № 2

Исследования механических свойств показали, что твердость поверхностного слоя увеличивается в 1,5...3,5 раза, износостойкость повышается в 4...5 раз, шероховатость контактирующих поверхностей уменьшается в 2,5 - 10 раз (табл. 2).

Таблиця 2 – Механические свойства сталей

Материал	Механические свойства		
	Твердость НВ	Шероховатость R <sub>a</sub> , мкм	Износостойкость, мм <sup>3</sup>
Сталь 45, исходное состояние	179	2,5	2,1·10 <sup>-11</sup>
Сталь 45, после обработки геоактиватором	550	0,8	0,6·10 <sup>-11</sup>
Сталь 40ХН, исходное состояние	200	1,25	1,5·10 <sup>-11</sup>
Сталь 40ХН, после обработки геоактиватором	585	0,2	0,4·10 <sup>-11</sup>

Таким образом, действие геомодификаторов обуславливает возникновение уникального трибологического эффекта.

### Possible effects of geoactivators friction in friction units of machine parts

V. Kozechko<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> State Higher Educational Institution "National Mining University", Karl Marx av., 19, Dnepropetrovsk, Ukraine, 49000

The paper shows a new method of restoration of interacting nodes using geoactivators friction. This method allows to reduce the wear on the surface, as well as to restore the functional condition of the worn surfaces without interrupting operation of mechanisms. The idea is based on using a new generation of geoactivators and management processes in the contact zone of friction pairs to increase the durability and longevity of machinery. It was found that the mechanism of action consists in the ionic diffusion of the components of special tribological composition. The research is based on the selection of the composition of tribological materials, determining the physical and chemical characteristics of geoactivators, using computer technology, testing machines and equipment, tools for monitoring the process of friction and wear, carrying out of a modern metallophysical analysis and analytical and statistical processing of experimental data.

Experimental studies of the mechanism of interaction geoactivators with different structural materials under friction, which included the analysis of damage of units and parts of mining and metallurgical equipment during their interaction were held. The analysis of chemical composition of the powder materials used to manufacture geoactivators was carried out. Metallographic studies of the friction surfaces using geoactivators and study of the influence geomodifiers on mechanical and performance characteristics of materials were undertaken.

The studies on the friction surfaces after treatment by geoactivators showed that geoactivators components diffuse into the surface layers of the material and form crystalline layers, which are solutions of the components in phase components geoactivators steels and cast iron surface. Investigations of mechanical properties showed that the hardness and wear resistance of the surface layer increases and the roughness of the contact surfaces reduce.

Keywords:

**Keywords:** renovation of the surface, a pair of friction, roughness, wear resistance, hardness, silicates.

### Можливий механізм дії геоактиваторів тертя в трибоспряженнях деталей машин

В. А. Козечко<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Державний вищий навчальний заклад «Національний гірничий університет», просп. К. Маркса, 19, м. Дніпропетровськ, Україна, 49000

У роботі розглянуто можливий механізм дії геоактиваторів тертя у трибоспряженнях деталей машин. Дослідження хімічного складу поверхонь, що труться, після оброблення геоактиватором показали, що після обробки компоненти геоактиватора дифундують у поверхневі шари матеріалу та утворюють склокристалічні шари. Дослідження механічних властивостей показали, що твердість та зносостійкість поверхневого шару збільшуються, а шорсткість контактних поверхонь зменшується.

**Ключові слова:** тертя, геоактиватор поверхні, шорсткість, зносостійкість, твердість, силікати.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Дидык Р. П. Технология производства и ремонт горных машин / Р. П. Дидык, В. Н. Забара, П. М. Шилов. - Днепропетровск, 2005. - 422 с.
2. Онищук Н. Ю. Улучшение триботехнических свойств металлолакирующих пластичных смазок комплексобразующими соединениями / Н. Ю. Онищук, А. С. Кужаров, А. А. Кутьков // Трение и износ. - 2000. - Т. 1, № 1. - С. 428 - 457.
3. Комаров С.Н. Металлолакирующие смазочные материалы для пар трения сталь - сталь / С.Н. Комаров, В.Ф. Пичугин, Н.Н. Комарова // Долговечность трущихся деталей машин. - 1990. - № 5. - С. 70 - 85.
4. Гуляев А. П. *Металловедение*/ А.П. Гуляев. – М. : Металлургия, 1978. – 648 с.
5. Безрукавая В.А. Пути преодоления триботехнического барьера в целях повышения ресурса горного оборудования / Р. П. Дидык, В. В. Зиль, В. А. Безрукавая // Горный журнал. – 2011. – № 2. – С. 54 – 57.

## REFERENCES

1. Didyk, R. P., Fence, V. N. Shilov, P. M. (2005). *Tekhnologiya proizvodstva i remont gornykh mashin* [The technology of production and repair of mining machinery]. – Dnepropetrovsk [in Russian].
2. Onischuk, N. Y., Kuzharov, A.S., Kutkov, A. A. (2000). *Uluchsheniye tribotekhnicheskikh svoystv metalloplakiruyushchikh plastichnykh smazok kompleksobrazuyushchimi soyedineniyami* [Better tribological properties of lubricating greases metalplacking complexing compounds]. *Friction and wear*, Volume 1 , № 1, 428-457 [in Russian].
3. Komarov, S. N., Pichugin, V. F., Komarov, N. N. (1990). *Metalloplakiruyushchiye smazochnyye materialy dlya par treniya stal' - stal'* [Metalcladding lubricants for friction pairs steel – steel] *Durability of friction machine parts*, 5, 70 – 85 [in Russian].
4. Gulyaev, A. P. (1978). *Metallovedeniye* [Metallurgy]. – Moscow: Metallurgy [in Russian].
5. Bezrukavaya, V. A., Didyk, R. P., Zil, V. V., Bezrukavaya, V. A. (2011). *Puti preodoleniya tribologicheskogo bar'yera v tselyakh povysheniya resursa gornogo oborudovaniya* [Ways to overcome the barrier tribological in order to increase resource mining equipment]. *Mining Journal*, 2, 54 – 57 [in Russian].





## Метод расчета величины обжатий по толщине стенки вдоль конуса деформации станов холодной пильгерной прокатки труб

С. В. Пилипенко<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> *Национальная металлургическая академия Украины, просп. Гагарина, 4, г. Днепропетровск, Украина, 49600*

### Article info:

Paper received:

23 May 2015

The final version of the paper received:

09 November 2015

Paper accepted online:

30 November 2015

### Correspondent Author's Address:

<sup>1)</sup> 44-08@mail.ru

В статье проведен анализ и предложено развитие существующего метода расчёта величины обжатий по толщине стенки вдоль конуса деформации холодной пильгерной прокатки. Развитый метод может применяться как при стандартной схеме выполнения подачи – поворота, так и при ведении процесса ХПТ с подачей и поворотом как перед прямым, так и перед обратным ходом. Величина обжатия по толщине стенки вдоль конуса деформации является определяющей при расчёте обжатия по толщине стенки в мгновенном очаге деформации, от которой, в свою очередь, зависит точность расчётов энергосиловых параметров процесса. Предложенное в статье позволит учитывать при расчётах величины обжатия в станах ХПТ как величину недеформируемой части металла, возникшую вследствие упругой деформации клетки, так и ту часть объёма металла, которая не деформируется после рабочего хода клетки в следствие наличия выпусков ручья. Это позволит повысить точность распределения величины обжатия по толщине стенки между прямым и обратным ходами клетки в контрольных сечениях конуса.

**Ключевые слова:** холодная пильгерная прокатка, пластическая деформация, конус деформации, толщина стенки, величина деформации.

## ВВЕДЕНИЕ

В последнее время в практике холодной прокатки труб (процесс ХПТ) широко применяются интенсивные режимы обжатий, позволяющие сократить цикличность производства. Производимые реконструкции прокатных станов и установка нового оборудования дают возможность вести процесс ХПТ с подачей и поворотом в обоих положениях клетки, процесс на высоких числах двойных ходов и пр. Новые процессы требуют уточнения метода расчета силовых параметров процесса ХПТ. Точность расчетов силовых параметров зависит от точности определения деформационных, поэтому в теории пильгерного процесса этой теме уделяется значительное внимание [1].

**Целью статьи** являются анализ и развитие существующего метода расчёта величины обжатий по толщине стенки вдоль конуса деформации, так как эта величина является определяющей при расчёте обжатия в мгновенном очаге деформации, от которой, в свою очередь, зависит точность расчётов энергосиловых параметров процесса.

## АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ

Согласно правилу П. Т. Емельяненко «величина обжатия в периодической части пилигримовой головки равняется разности между высотой рассмат-

риваемого сечения и высотой сечения, отстоящего от него на таком расстоянии, при котором объём, заключённый между этими сечениями, равен объёму подачи металла» [2]. Одним из важнейших вопросов является проблема определения расстояния между этими сечениями ( $\Delta x$ , см. рис. 1).

В настоящее время для определения величины  $\Delta x$  наиболее часто используют формулу Я. Е. Осады [3]:

$$\Delta x = \frac{\sqrt{S_x + 2(tg\gamma - tg\alpha) \frac{mS_3(S_3 - D_3)}{D_x - S_x}} - S_x}{tg\gamma - tg\alpha} \quad (1)$$

где  $S_x$  – толщина стенки трубы в сечении;  $tg\gamma$  и  $tg\alpha$  – конусности развертки калибра и оправки на участке.

Для расчёта величины обжатия по толщине стенки трубы вдоль конуса деформации за цикл пильгерной прокатки могут использоваться две формулы:

- формула Я. Е. Осады:

$$\Delta S_\Sigma = \sqrt{S_x^2 + 2 \cdot \frac{mS_3(S_3 - D_3)}{D_x - S_x} (tg\gamma - tg\alpha)} - S_x; \quad (2)$$

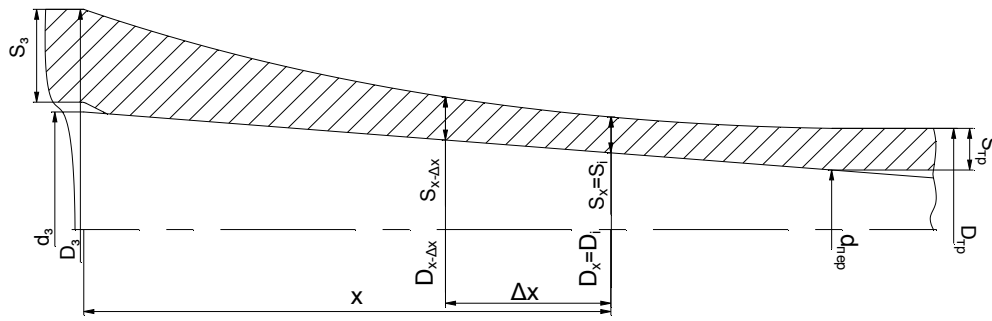


Рисунок 1 - Схема к определению обжатия по толщине стенки трубы вдоль конуса деформации за цикл пильгерной прокатки

- формула Б.М. Рогова:

$$\Delta S_{\Sigma} = m \mu_{\Sigma x} (tg \gamma - tg \alpha), \quad (3)$$

где  $\mu_{\Sigma x} = F_3 / F_x$ .

**Выделение нерешённого.** В существующем на данный момент методе расчета величины обжатий по толщине стенки вдоль конуса деформации распределение обжатий между прямым и обратным ходами осуществляется с помощью эмпирического коэффициента, что уменьшает точность расчётов. Развитие метода расчёта параметров процесса холодной пильгерной прокатки в этом направлении является актуальным.

## ОСНОВНОЙ МАТЕРИАЛ

После обратного хода форму поперечного сечения трубы можно с небольшими допущениями считать кольцевидной (в случае ведения процесса с выполнением подачи и поворота классическим способом). Тогда площадь поперечного сечения контрольных сечений конуса деформации равна

$$F_{x.obr} = \pi \cdot S_x (D_x - S_x). \quad (4)$$

Однако после прямого хода в выпусках толщина стенки трубы полностью не раскатывается (см. рис. 2) и остаётся утолщённой.

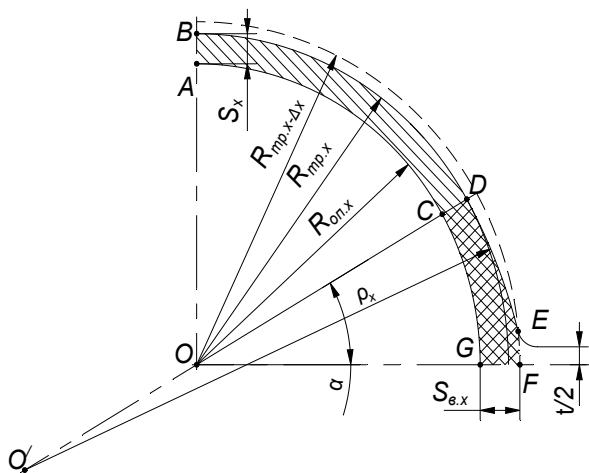


Рисунок 2 - Форма поперечного сечения трубы в сечениях конуса деформации стана холодной пильгерной валковой прокатки (при использовании калибра с выпусками «по радиусу»)

В станах ХПТ зазор между оправкой и внутренней поверхностью трубы в зоне выпусков практически отсутствует, зазор между калибрами очень мал, тогда площадь сечения

трубы после прямого хода в любом сечении конуса деформации состоит из суммы площадей трубы в донной части калибра и суммы площадей трубы в выпусках:

$$F_{x.np} = 4(F_{ABDC} + F_{CDEFG}). \quad (5)$$

Площадь поперечного сечения трубы в донной части калибра равна

$$F_{ABDC} = \frac{0.5\pi - \alpha}{2} (R_{mp.x}^2 - R_{on.x}^2). \quad (6)$$

На рисунке 3 показана детальная схема части поперечного сечения трубы находящейся в выпусках калибра. Из треугольника  $O'OF$ :

$$\frac{B/2}{\sin \gamma} = \frac{\rho}{\sin(\pi - \alpha)} \quad (7)$$

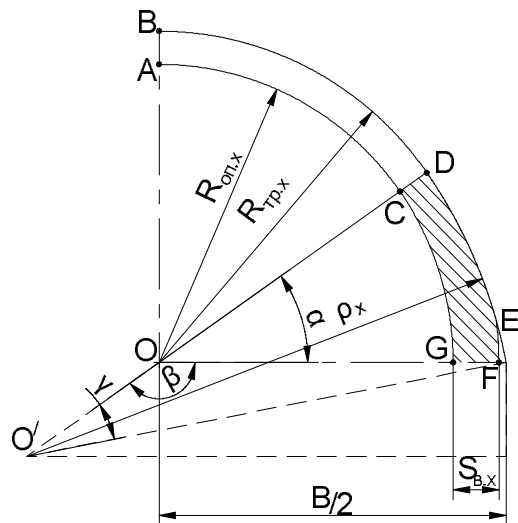


Рисунок 3 - К расчету площади выпусков трубы в сечениях конуса деформации стана холодной пильгерной валковой прокатки (при использовании калибра с выпусками «по радиусу»)

Из (7):

$$\gamma = \arcsin \left( \frac{0.5B \cdot \sin(\pi - \alpha)}{\rho} \right). \quad (8)$$

Тогда с небольшими допущениями площадь  $CDEFG$

$$F_{CDEFG} = 0.5 \arcsin \left( \frac{0.5B \cdot \sin(\pi - \alpha)}{\rho} \right) (\rho^2 - (\rho - S)^2). \quad (9)$$

Окончательно площадь трубы после прямого хода

$$F_{x.np} = 4 \cdot \left( \frac{0.5\pi - \alpha}{2} (R_{mp.x}^2 - R_{on.x}^2) + 0.5 \arcsin \left( \frac{0.5B \cdot \sin(\pi - \alpha)}{\rho} \right) \left( \rho^2 - (\rho - S)^2 \right) \right), \quad (10)$$

где  $S_0$  – толщина стенки в выпусках;  $\alpha$  – угол выпуска в радианах.

Вытяжка трубы за прямой ход

$$\mu_{\Sigma x.np} = \frac{F_3}{F_{x.np}}. \quad (11)$$

Исходя из (3, 4, 10, 11), обжатие по толщине стенки вдоль конуса деформации после прямого хода клетки можно рассчитать по формуле

$$\Delta S_{nn_x} = \frac{m \cdot \pi (D_3 - S_3) S_3 \cdot (tg \gamma - tg \alpha)}{4 \cdot \left( \frac{0.5\pi - \alpha}{2} (R_{mp.x}^2 - R_{on.x}^2) + 0.5 \arcsin \left( \frac{0.5B \cdot \sin(\pi - \alpha)}{\rho} \right) \left( \rho^2 - (\rho - S)^2 \right) \right) + \pi \cdot (D_i + \Delta_{np.x}) \Delta_{np.x}} \quad (12)$$

где  $\Delta_{np}$  – величина упругих деформаций при прямом ходе.

Зная из формулы 3 общую вытяжку за цикл прокатки, величина обжатия при обратном ходе клетки составляет

$$\Delta S_{oob_x} = \Delta S_x - \Delta S_{nn_x}. \quad (13)$$

На рисунке 4 показаны результаты расчетов величины обжатия по толщине стенки в контрольных сечениях зоны обжатия согласно предложенному методу. Как видно из графика, доля величины обжатия по толщине стенки, которая остаётся для раскатки при обратном ходе клетки, колеблется от 9,4 до 20,3 %. Как видно из графика (рис. 4), с увеличением величины подачи  $m$  величина недеформируемой части металла при прямом ходе клетки растет. Это случается вследствие увеличения упругих деформаций клетки и необходимого для ведения процесса увеличения значений развалки калибров.

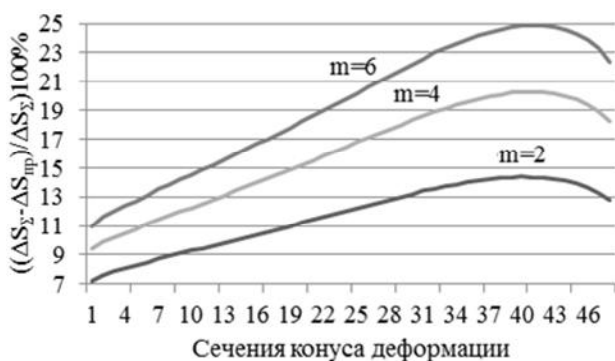


Рисунок 4 - Результаты расчетов изменения распределения величины обжатия по толщине стенки вдоль конуса деформации при различных значениях величины подачи (стан ХПТ-32, маршрут - 38x3,2-25x1,65)

В существующем методе расчета распределение обжатий между прямым и обратным ходами осуществлялось бы коэффициентом, оставляя соотно-

шение между обжатиями при прямом и обратном ходами неизменным. Таким образом, величина металла в выпусках калибра и величина упругих деформаций при расчете не учитывались, что снижало бы точность расчетов.

Предложенный метод можно использовать для расчёта величины обжатий по толщине стенки вдоль конуса деформации в случае ведения процесса ХПТ с подачей и поворотом как перед прямым, так и перед обратным ходом.

Однако следует учитывать, что данный процесс усложнён следующими факторами: обжатия происходят как при прямом, так и при обратном ходах; наблюдается принципиальная разница в процессах деформации прямого и обратного ходов.

Первый фактор не позволяет игнорировать упругие деформации обратного хода. Также следует учесть величину вытяжки, вызванную величиной недеформированного металла выпусков от предыдущего хода.

Также следует учесть особенности процессов деформации при обратном ходе клетки. Основное отличие в том, что величина обжатия в периодической части пилигримовой головки при обратном ходе клетки равняется разности между высотой рассматриваемого сечения и высотой сечения, отстоящего от первого на расстоянии, равном произведению величины подачи трубы перед обратным ходом на величину вытяжки в мгновенном очаге деформации (см. рис. 5). Другими словами, объем металла между этими сечениями может отличаться от объема подачи.

При обратной из-за полученных в ходе деформации величине вытяжки конус деформации сдвигается не перед движущейся клетью (как при прямом ходе), а позади движения клетки. Тут наблюдается процесс периодической прокатки с нарастающим обжатием, а не процесс пильгерования в своём обычном представлении.

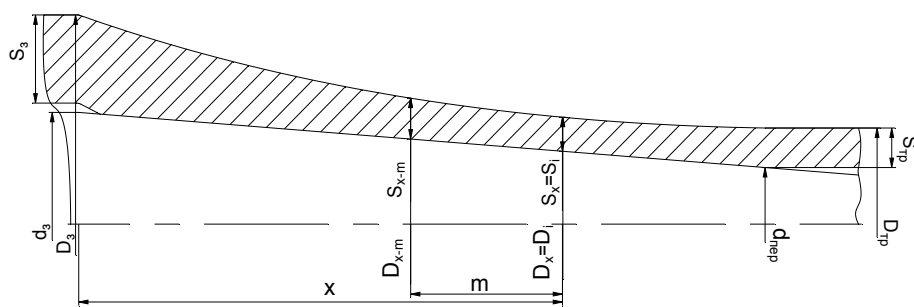


Рисунок 5 - Схема к определению обжатия по толщине стенки трубы при обратном ходе клетки

Данный постулат нигде не сформулирован в таком виде, однако он реализован в следующей формуле [4]:

$$\Delta S_{обр} = m_{обр} \mu_x \mu_{x\_MzOбр} (tg\gamma - tg\alpha) + (\Delta_{нрх} - \Delta_{обрх}), \quad (14)$$

где  $\mu_{x\_MzOобр}$  – вытяжка в сечении, в мгновенном очаге деформации при обратном ходе.

## ВЫВОДЫ

В ходе анализа существующего метода расчёта величины обжатия трубы по толщине стенки вдоль конуса деформации станов холодной пильгерной

прокатки труб сделан вывод о том, что существующий на данный момент метод расчёта этой величины требует развития. Распределение величины обжатия между прямым и обратным ходами осуществляется с помощью коэффициента, который не в полной мере учитывает влияния множества факторов процесса. Предложенное развитие метода позволяет учитывать при расчётах величины обжатия в станах ХПТ как величину недеформируемой части металла, возникшую вследствие упругой деформации клетки, так и ту часть объёма металла, которая не деформируется после рабочего хода клетки вследствие наличия выпусков ручья. Данное предложение позволит повысить точность расчётов деформационных параметров пильгерной прокатки труб.

## The development of calculation method for reducing of wall thickness along the cone of deformation at the cold rolling mills

S. V. Pilipenko<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> National metallurgical academy of Ukraine, Gagarina avenue, 4, Dnepropetrovsk, Ukraine, 49000

The development of calculation method for reducing of wall thickness along the cone of deformation at the cold rolling mills.

The process of cold pilger rolling is widely used for manufacturing cold and hot deformed precision pipes of a wide range of alloys and steel grades. Cold and hot rolling as well as rolling without emulsion are used in the cold pilger rolling, process. It is very dynamic nowadays and modern mill permit lip to more than 280 double movements per minute. In spite of relatively small feed (2 - 4 mm) and considering the deformation cone length (300 - 500 mm), metal is shaped in rather tough conditions.

The article deals with the analysis and the development of the existing calculation method for reducing wall thickness along the cone of deformation at the CRM. The developed method can be used both in the process of standard feed and the feed with rotary movement before the forward stroke as well as before the backward stroke. The value of swaging is crucial for calculations of swaging in an instantaneous deformation site, which, by-turn, defines the calculation accuracy of energy-power parameters of the process. The offered method allows to consider both the amount of metal which hasn't been deformed due to elastic deformation of a stand and the amount of metal which hasn't been deformed after the working stroke of the stand because there are groove outlets. That makes possible to increase the delivery accuracy of swaging of the wall thickness between the forward and backward strokes at the testing cone sections.

Thus there is a possibility to improve the calculation accuracy. The calculations results have been checked in practice process of cold pilger rolling and prove the method efficiency.

**Key words:** Cold pilger rolling, plastic deformation, deformation cone, wall thickness, value of deformation.

## Метод розрахунку величини обтиснень по товщині стінки уздовж конуса деформації станів холодної пильгерної прокатки труб

С. В. Пилипенко<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Національна металургійна академія України, просп. Гагаріна, 4, м. Дніпропетровськ, Україна, 49600

У статті зроблено аналіз і запропоновано розвиток існуючого методу розрахунку величини обтискань по товщині стінки уздовж конуса деформації станів холодної пільгерної прокатки. Розвинутий метод може застосовуватись як при стандартній схемі виконання подачі – повороту, так і при введінні процесу ХПТ із подачею й поворотом як перед прямим, так і перед зворотним ходом кліті. Величина обтискань по товщині стінки вздовж конуса деформації є визначальною при розрахунку величини обтиску по товщині стінки в миттєвому осередку деформації, від якого, у свою чергу, залежить точність розрахунків енергосилових параметрів процесу.

Запропоноване у статті дозволяє враховувати при розрахунках як величину недеформованої частини металу, що виникла в наслідок пружної деформації кліті, так і ту частину об'єму металу, що не деформується після робочого ходу кліті внаслідок наявності випусків виступів. Це дозволяє підвищити точність розподілу величини тиску по товщині стінки між прямим і зворотним ходами кліті в контрольних перерізах конуса деформації.

**Ключові слова:** холодна пільгерна прокатка, пластична деформація, конус деформації, товщина стінки, величина деформації.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Шевакин Ю. Ф. Калибровка и усилия при холодной прокатке труб / Ю. Ф. Шевакин. – М : Metallurgizdat, 1963. - 269 с.
2. Емельяненко П. Т. Теория косой и пилигримовой прокатки / П. Т. Емельяненко – М : Metallurgizdat, 1949. – 491 с.
3. Орро П. И. Производство стальных тонкостенных труб: [Монография] / П. И. Орро, Я. Е. Осада. - М; Харьков : Metallurgizdat, 1951. - 416 с.
4. Попов В. М. Совершенствование процесса периодической прокатки труб / В. М. Попов, С. В. Атанасов, Ю. М. Беликов – Днепропетровск : Дива, 2008. – 191 с.

## REFERENCES

1. Shevakin, YU. F. (1963). Kalibrovka i usiliya pri kholodnoy prokatke trub [Calibration and effort in cold rolled tube] Moscow: Metallurgizdat [in Russian].
2. Yemel'yanenko, P. T. (1949) Teoriya kosoy i piligrimovoy proka-tki [Theory oblique and Pilger rolling] Moscow: Metallurgizdat [in Russian].
3. Orro, P. I., Osada, Y. Y. (1951) Proizvodstvo stal'nykh tonkostennykh trub [Production of steel thin-walled pipes] Khar'kov : Metallurgizdat [in Russian].
4. Popov, V. M., Atanasov, S. V., Belikov, Y. M. (2008) Sovershenstvovaniye protsessa periodicheskoy prokatki trub [Improving the process of periodic rolling tube] Dnepropetrovsk : Diva [in Russian].



## Проблемы математического моделирования процессов лазерной очистки в промышленности

И. И. Головин<sup>1)</sup>, Е. В. Цегельник<sup>2)</sup>, С. И. Планковский<sup>3)</sup>

<sup>1), 2), 3)</sup> *Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», ул. Чкалова, 17, Харьков, Украина, 61070*

### Article info:

Paper received:

The final version of the paper received:

Paper accepted online:

13 May 2015

01 October 2015

30 November 2015

### Correspondent Author's Address:

<sup>2)</sup> [y.tsegelnyk@gmail.com](mailto:y.tsegelnyk@gmail.com)

Целью данной статьи является анализ существующих подходов к математическому моделированию процессов, сопровождающих лазерную очистку поверхности детали для определения рациональных методов при их моделировании. Широкое применение лазера для целей промышленной очистки и дороговизна экспериментального оборудования вынуждают искать альтернативные способы исследования данной проблемы.

В статье рассмотрены проблемы, возникающие при попытках моделирования процессов взаимодействия лазерного излучения с удаляемым веществом, и осуществлена попытка обобщения описания математических процессов лазерного нагрева и разрушения. В результате анализа при использовании аналитических методов исследования были выявлены недостатки существующих подходов при моделировании процессов лазерной очистки и определены наиболее приемлемые направления их дальнейшего исследования.

**Ключевые слова:** абляция, лакокрасочное покрытие, фазовый переход, метод молекулярной динамики.

## ВВЕДЕНИЕ

В мировой аэрокосмической промышленности лазеры активно используются для широкого круга задач по обработке широкой номенклатуры деталей. Одной из областей, в которой перспективно применять лазерные технологии, является очистка поверхностей от различных загрязнений в процессе ремонта или в результате регламентных и восстановительных работ авиационной техники [1].

Лазерный нагрев может сопровождаться изменением оптических и теплофизических свойств материала, его тепловым расширением, а также фазовыми переходами в твердом состоянии и плавлением. Высокие скорости нагрева и охлаждения и большие пространственные градиенты температуры обуславливают особенности лазерного нагрева. Они могут привести и приводят к значительным отличиям в протекании тепловых процессов, стимулированных лазерным воздействием.

Очистка поверхности детали от загрязнения или от покрывающего лакокрасочного покрытия (ЛКП) при помощи лазерного воздействия подразумевает частичное разрушение облучаемого объекта.

Следует отметить, что термин «разрушение» при воздействии лазерного излучения на материалы достаточно условен. Это связано с тем, что процесс разрушения является многостадийным.

Можно выделить несколько механизмов разрушения поглощающих материалов: термомеханические, химические, плавление, испарение и ударная

волна.

Не стоит забывать, что при попытках лазерного удаления загрязнений или снятия ЛКП возможен частичный или полный переход последних из твердой фазы в жидкую, а затем в парообразную или обратно в твердую. При этом в зоне действия лазерного луча при расплавлении поверхности возникают явления, связанные с различными видами гидродинамических неустойчивостей, возникающих частично по причине вышеупомянутых фазовых переходов. Наиболее часто встречающимися на практике являются неустойчивости: Кельвина-Гельмгольца (или «ветровая»), термокапиллярная, концентрационная, концентрационно-термокапиллярная. Эти явления ответственны за формирование рельефа на поверхности обрабатываемой детали [2].

Наличие всех вышеперечисленных процессов создаёт определённые сложности при моделировании процесса лазерной очистки. Целью настоящей работы является анализ существующих подходов к математическому моделированию процессов, сопровождающих лазерную очистку поверхности детали для определения рациональных методов при их моделировании.

## ПРОЦЕССЫ, СОПРОВОЖДАЮЩИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ

Лазерный нагрев по своей физической сущности не отличается от других видов нагрева. Как и при

любом другом нагревании, однозначной характеристикой теплового действия является температура, а сам нагрев состоит в увеличении амплитуды тепловых колебаний решетки.

Воздействие лазерного излучения на вещество может осуществляться в широком диапазоне энергий (от  $10^3$  Вт·см<sup>-2</sup> и более). Различным диапазонам энергий соответствуют различные эффекты и соответственно разрабатываемые модели физических процессов, происходящих при взаимодействии когерентного излучения с твердым телом. При воздействии на твердые тела интенсивность лазерного излучения можно разделить на несколько диапазонов (рис. 1) [2].

К умеренным интенсивностям относят способность материалов не разрушаться при воздействии лазерного излучения. При этом происходит воздействие лазерного излучения на подсистему структурных дефектов в материале, также возможны фазовые переходы.

К средним диапазонам относят способность лазерного излучения формировать ванну расплава на поверхности облучаемого материала, а также частично испарять облучаемый материал. К высоким интенсивностям относят способность лазерного излучения образовывать высокоионизированную плазму над поверхностью облучаемого объекта.

При лазерном воздействии на материалы наблюдаются многообразные процессы и явления, которые приводят к изменению оптических и электрических характеристик материала, его структуры и фазового состава.

Отметим основные физико-химические явления: плавление, испарение, кристаллизацию, термохимические реакции.

При облучении кристаллического или поликристаллического твердого тела лазерным излучением достаточной плотности мощности его температура может возрасти до температуры плавления. Температуры плавления различных материалов сильно различаются. Соответственно меняется как количество теплоты, которое необходимо для нагревания металла от комнатной температуры до температуры плавления, так и скрытая теплота фазового перехода твердое тело – расплав. При этом роль скрытой теплоты плавления, т. е. теплоты, необходимой для разрушения кристаллической решетки тела, тем больше, чем ниже температура плавления.

Жидкая фаза, образовавшаяся при плавлении твердого тела, может быть нагрета до температуры испарения.

Фазовый переход жидкость – пар происходит при подводе в зону воздействия количества теплоты, равного или большего теплоты испарения.

Лазерный нагрев веществ может стимулировать протекание необратимых химических реакций, которые вызывают ускорение процесса разрушения материала. Большой тепловой вклад экзотермических реакций, инициируемых в зоне нагрева, приводит к воспламенению материала, которое может перейти в автономный режим. При этом материал воспламеняется в области, размеры которой многократно превосходят зону облучения.

Взаимосвязь физических процессов, сопровождающих процесс воздействия лазерного излучения на материалы, изображена на рис. 2 [3].

Совокупность физических процессов в зоне воздействия определяется температурой, скоростью и временем нагрева, скоростью охлаждения материала, которые, в свою очередь, зависят от геометрических и энергетических характеристик лазерного излучения, свойств обрабатываемого материала, массы облучаемого изделия, технологических схем обработки и т. д.

Как известно, в рамках теории действия лазерного излучения на объемные материалы существует достаточно попыток количественно описать процессы поглощения лазерного излучения разного рода покрытиями, их нагревания и разрушения [4 – 7]. Попытаемся провести анализ существующих моделей, их систематизацию и определить степень применимости на практике.

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ И СЛОЖНОСТИ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ

При описании процесса воздействия лазерного излучения на твердые непрозрачные тела (металлы, полупроводники, диэлектрики) можно выделить три стадии: нагревание без фазовых переходов; плавление, испарение; ионизация испаряемого вещества и образование плазмы. Простейший способ описания воздействия лазерного излучения – описание отдельных стадий. Полученные результаты могут быть использованы для описания более сложного случая, когда эти стадии нельзя четко разделить.

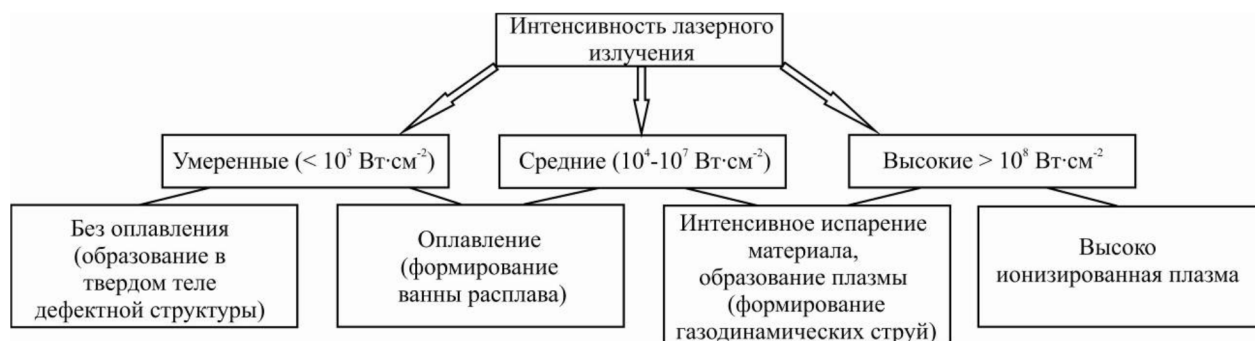


Рисунок 1 - Характерные диапазоны лазерного излучения



Рисунок 2 - Взаимосвязь физических процессов при воздействии лазерного излучения на материалы

Из всего множества существующих моделей, пытающихся по возможности описать как можно большее количество процессов, сопровождающих процесс лазерной абляции, можно выделить следующие три: тепловую модель, двухтемпературную и гидродинамическую модели. Данные модели были разработаны такими видными учеными как А. М. Бонч-Бруевич, М. А. Ельяшевич, С. И. Анисимов, Джон Реди (J. F. Ready), Я. А. Имас, и позволяют в определенной мере провести исследование большинства процессов, протекающих при взаимодействии лазерного излучения с веществом.

Существует также достаточно моделей, пытающихся описать отдельные стадии процесса лазерной абляции, но комплексно данную задачу из широко известных моделей способны решить лишь три ранее вышеперечисленные.

Вследствие того, что излучение поглощается тонким приповерхностным слоем материала, для описания взаимодействия лазерного излучения с металлами можно использовать так называемую «тепловую модель». Согласно этой модели можно рассматривать независимо друг от друга четыре стадии воздействия: поглощение света и переход поглощенной энергии в тепло; нагрев материалов без разрушения; разрушение и разлёт продуктов разрушения; остывание. Тепловая модель позволила успешно описать распространение тепла, плавление, модификацию структуры вещества.

На основе первых исследований лазерной абляции [6, 8] в 60-е годы XX в. была сформулирована так называемая тепловая модель лазерного испарения [4], не претерпевшая в последующем существенных изменений.

Поскольку температуру лазерной абляции трудно измерить с хорошей точностью, особую актуальность приобретает задача ее точного вычисления. Эта задача достаточно сложна. Вычисления, основанные на решении линейного уравнения теплопроводности,

применяемого в тепловой модели, чересчур упрощены и иногда не годятся даже для качественных оценок. Численные расчеты с применением разностных методов для уравнений в частных производных, напротив, чересчур громоздки и непригодны для быстрого анализа экспериментальных данных. Данная ситуация вызывает ряд проблем, связанных с широким применением тепловой модели на практике.

При использовании более коротких (субпикосекундных) лазерных импульсов в кинетике абляции возникают особенности, которые уже нельзя описать в рамках обычной тепловой модели.

Двухтемпературная модель для описания переходных явлений в неравновесном электронном газе и решетке при субпикосекундном лазерном воздействии была предложена более 40 лет назад и описывает транспорт энергии внутри металла с помощью связанных уравнений теплопроводности для температуры электронов  $T_e$  и решетки (фононов)  $T_i$  [5, 9]:

$$c_e \frac{\partial T_e}{\partial t} = c_e \nu \frac{\partial T_e}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left( \chi_e \frac{\partial T_e}{\partial z} \right) + Q - \mu (T_e - T_i),$$

$$c_i \frac{\partial T_i}{\partial t} = c_i \nu \frac{\partial T_i}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left( \chi_i \frac{\partial T_i}{\partial z} \right) + Q - \mu (T_i - T_e).$$

Здесь  $c_e$  и  $c_i$  – удельные теплоемкости [Дж см<sup>-3</sup> К<sup>-1</sup>] электронов и решетки;  $\chi_e$  и  $\chi_i$  – соответствующие коэффициенты теплопроводности, параметр  $\mu = c_e / \tau$  характеризует скорость обмена энергией [Вт см<sup>-3</sup> К<sup>-1</sup>] между электронной и решеточной подсистемами ( $\tau$  – характерное время обмена для электронной подсистемы).

Поглощение электронами лазерной энергии описывается с помощью источника:

$$Q = -\frac{\partial I}{\partial z} = \alpha I, \quad I(0, t) = I_S(t),$$

где  $\alpha$  – коэффициент поглощения;  $I_S$  – интенсивность излучения на поверхности металла ( $z = 0$ ). Величина  $I_S(t) = \alpha I(t)$  зависит от формы лазерного импульса  $I(t)$  и поглощательной способности вещества  $A = 1 - R$  ( $R$  – коэффициент отражения излучения). Для ультракороткого лазерного импульса пароплазменное облако образуется после окончания импульса и не оказывает влияния на процесс абляции.

Для детального сопоставления этой модели с экспериментом требуется измерять различные характеристики с субпикосекундным временным разрешением, что само по себе является достаточно сложной задачей. Некоторые характеристики вообще сложно измерить непосредственно; поэтому анализ физиче-



ских механизмов, вовлеченных в абляцию под действием ультракоротких лазерных импульсов, приходится делать на основе теоретического анализа «косвенных» экспериментальных данных.

Следует отметить еще одно обстоятельство. Двухтемпературная модель применима в случае, когда можно использовать классические законы Фурье для описания переноса тепловой энергии электронов и фононов. Это означает, что модель применима для времен, намного больших, чем характерное время установления равновесного распределения в электронном газе.

Описанная выше простая двухтемпературная модель испарения пригодна при температурах, значительно меньших критической, когда существует резкая граница (масштаба межатомных расстояний) между паром и конденсированной фазой, а плотность пара намного меньше плотности конденсированного вещества. С ростом температуры резкая межфазная граница размывается в макроскопический переходный слой, структуру и динамику которого можно описать полной системой уравнений гидродинамики.

Эта система уравнений должна быть дополнена уравнением состояния и данными о теплоемкости, теплопроводности и электропроводности вещества в широкой области фазовой диаграммы, включающей критическую точку и двухфазную область. Модель, описывающая данные процессы, получила название «гидродинамическая модель».

Пример одномерной гидродинамической модели для «сквозного» численного расчета лазерной абляции представлен в работе [9]. Для газодинамических расчетов обычно применяют построенные на основе экспериментальных данных полуэмпирические уравнения состояния, что в значительной степени затрудняет применение описанной модели на практике.

Однако следует помнить, что основным механизмом поверхностного разрушения материалов в процессе лазерной абляции является испарение.

Обобщив вышеописанные тепловые модели, можно сказать, что процесс испарения математически описывают в рамках краевой задачи теплопроводности. Данная задача рассматривается для конденсированной среды в системе координат, связанной с подвижной межфазной границей твердое тело – пар или расплав – пар, на которой происходит испарение.

Задача о движении границы испарения может быть рассмотрена в рамках одномерной модели [3]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial t} - v_{ev}(t) \frac{\partial T}{\partial z} - a \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} &= \frac{q\alpha}{\rho c} \exp(-\alpha z), \\ -\kappa \frac{\partial T}{\partial z} &= q - v_{ev} \rho \Delta H, \\ T(z, 0) = T(\infty, t) &= 0, \end{aligned}$$

где  $\Delta H = L_{ev} - RT/2$  разность удельных энтальпий твердой и газообразных фаз;  $v_{ev}(t)$  – скорость движения межфазной границы.

Первым недостатком модели является необходимость опускать боковой отвод энергии лазерного излучения за счет теплопроводности. Вторым недо-

статком является тот факт, что краевая задача теплопроводности существенно нелинейна, поэтому ее общего аналитического решения не существует.

Стационарно рассматривать процесс испарения возможно лишь в рамках следующих допущений:

а) концентрация плазмы вблизи поверхности невелика, поэтому эффектами экранирования лазерного излучения можно пренебречь;

б) все подводимое тепло идет на испарение;

в) фазовая граница движется с постоянной скоростью  $v_{ev}(T_{cm}) = v_0$ .

Как мы видим, данные допущения значительно уводят математическое моделирование эксперимента от его реального протекания.

Не стоит забывать также, что при плотностях потоков  $q \geq 10^8$  Вт/см<sup>2</sup> происходит разрушение за счет ударной волны, выноса расплава под действием давления отдачи пара или его вскипания и т. д. Моделирование температурного поля и скорости вытеснения расплава является очень сложной задачей.

Рассмотрим двухфазную модель удаления поверхностного материала из зоны воздействия излучения, в которой учтено вытеснение расплава под действием давления отдачи паров [3]. Изменение толщины слоя расплава можно описать уравнением

$$-\frac{dh}{dt} = \bar{v}_{ev} + \frac{\bar{w}\Pi(h_0 - h)}{S},$$

где  $\Pi$ ,  $S$  – периметр и площадь области разрушения;  $h_0$  – исходная толщина пленки.

Необходимым условием является наличие информации о средней по времени скорости истечения расплава из зоны облучения  $\bar{w}$  и скорости испарения  $\bar{v}_{ev}$ . Очень часто такая информация доступна из предварительно проведенного эксперимента, что затрудняет само по себе процесс математического моделирования.

Поскольку сейчас еще нет общепринятых моделей нетепловых процессов, происходящих при воздействии сверхкоротких лазерных импульсов на вещество, авторы статьи посчитали возможным не обсуждать возможность их применения при лазерной очистке поверхности.

Во введении было упомянуто, что возможное появление расплава обрабатываемого вещества может послужить появлению различного вида гидродинамических неустойчивостей.

Под неустойчивостью в гидродинамике обычно понимают самопроизвольное нарастание отклонений от невозмущенного состояния среды, приводящее к качественному изменению поведения системы [10].

Одним из примеров таких явлений является неустойчивость Рэлея. Причиной неустойчивостей также является градиент температуры на поверхности жидкости. Другими механизмами неустойчивостей могут быть действие электрических и гравитационных сил и их комбинированное действие.

В общем случае появление гидродинамических неустойчивостей при локальном нагреве жидкостей сводится:

– к капиллярным силам (гравитационно-капиллярные волны);

– к конвективным течениям (ячейки Бенара, валиковая конвекция) [11];

– к образованию пограничных слоев жидкости (стратифицированные жидкости, движение жидкости на твердой поверхности, течения Пуазейля, Куэтта и др.) [12];

– к электрическим силам (неустойчивость Тонкса-Френкеля) [13];

– к флуктуационным силам (расклинивающее давление) [14].

Как уже было сказано выше, данное проявление гидродинамических неустойчивостей имеет место при наблюдении процесса обработки металла лазерным излучением [15, 16].

Однако следует отметить, что несмотря на тот факт, что исследованию гидродинамических устойчивостей при воздействии различных внешних факторов на конденсированные среды (при плавлении, испарении, остывании, и т. д.) посвящено немало статей и обзоров [17 – 19], на данный момент не существует четкой теории и единого подхода к моделированию данных процессов.

Также в стороне оставлен тот факт, что поверхностные электромагнитные волны (ПЭВ) или поляритоны играют большую роль в воздействии мощного лазерного излучения на материалы (металлы, полупроводники), приводящего к их нагреву и разрушению [3]. Одним из главных признаков и следствий генерации ПЭВ в процессе такого силового воздействия излучения на вещество является образование поверхностных периодических структур (ППС), представляющих собой систему упорядоченных линейных выступов и впадин рельефа поверхности. На данный момент нет точного представления об этом процессе и четкой математической модели, позволяющей его спрогнозировать.

Лишь некоторые из механизмов образования частиц в процессе лазерной абляции могут быть проанализированы с помощью теоретических термодинамических и кинетических моделей. Макроскопические модели процессов лазерной абляции в настоящее время либо весьма грубы, либо отсутствуют вовсе. Более того, в реальных условиях процессы, сопровождающие лазерную абляцию, могут проявляться совместно, внося вклад в формирование частиц на разных стадиях процесса эжекции и эволюции облака продуктов абляции. Таким образом, теоретическое описание лазерной абляции на макроскопическом уровне затруднено сложностью и многообразием происходящих при этом явлении физических процессов.

Альтернативой макроскопическому описанию является описание поведения материала мишени при лазерной абляции на уровне отдельных атомов или молекул при помощи численного подхода, основанного на компьютерном моделировании методом молекулярной динамики [20].

Метод молекулярной динамики (МД) – это метод компьютерного моделирования, позволяющий предсказывать эволюцию во времени системы взаимодействующих частиц (атомов, молекул, гранул и т. д.).

В простейшем случае частиц – материальных точек, не имеющих собственного строения, эти уравнения могут быть записаны в виде

$$m_i \frac{d^2 r_i}{dt^2} = F_i, \quad i = 1, 2, \dots, N,$$

где  $m_i$  и  $r_i$  – масса и радиус-вектор  $i$ -й частицы;

$F_i$  – сила, действующая на эту частицу со стороны остальных частиц системы.

Сила  $F_i$  может быть вычислена при помощи потенциала взаимодействия между частицами  $U(r_1, r_2, r_3, \dots, r_N)$ , который является функцией радиус-векторов всех частиц системы:

$$F_i = -\frac{\partial}{\partial r_i} U(r_1, r_2, r_3, \dots, r_N).$$

Если начальные условия (начальные положения и скорости всех частиц системы) и потенциал взаимодействия заданы, то уравнения движения могут быть решены численно. Траектории (координаты и скорости) всех частиц в зависимости от времени являются основным результатом расчетов методом МД. На основании известных данных о траекториях всех частиц системы можно рассчитать пространственную и временную эволюцию любых других структурных и термодинамических параметров системы, например, выполнить детальный анализ дефектов кристаллической структуры или фазовых превращений в материале и соотнести их с изменениями температуры и давления в системе.

Вполне вероятно применение метода МД как составной части многоуровневых численных моделей, предназначенных для описания разнообразных физических и химических процессов, протекающих при лазерной абляции, в широких диапазонах временных и пространственных масштабов.

Основное достоинство метода МД состоит в том, что для его использования необходимо определить лишь детали взаимодействий между отдельными атомами или молекулами в изучаемой системе (т. е. задать функцию потенциала взаимодействия между частицами) и не требуется каких-либо предположений о характере изучаемых процессов или макроскопических феноменологических законов, имеющих, как правило, сравнительно узкую область применимости. Это важное преимущество дает возможность с помощью метода МД проводить расчеты в таких условиях, где макроскопические феноменологические законы еще не установлены, а также выявлять в «компьютерном эксперименте» новые физические явления и процессы. Более того, в отличие от реального эксперимента МД-расчеты позволяют проводить анализ быстротекущих и неравновесных процессов и получать полную информацию об интересующем нас явлении, включая координаты и скорости отдельных атомов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение лазерного излучения для целей промышленной очистки и удаления ЛКП имеет большие перспективы в будущем. Но сложность процесса и вероятность разрушения обрабатываемого

образца требуют наличия предварительного математического моделирования данного процесса.

В данной работе совершена попытка последовательно и полноценно описать существующую картину физики процесса лазерного взаимодействия с твёрдым веществом, используя наиболее подходящие, на наш взгляд, подходы. Проведен системный анализ данной проблемы и выявлены сложности в реализации решения описанной задачи с указанием конкретных осложняющих факторов.

Показано, что большинство предлагаемых моделей нуждается в целом ряде поправочных коэффициентов экспериментального характера и не представляется возможным решить поставленную задачу аналитически. Таким образом, проблема взаимодействия лазерного излучения с твёрдым веществом в виде загрязнений поверхности или элементов лакокрасочных покрытий требует глубокого анализа внутренних физико-химических явлений, связанных с тепло- и массопереносом, а также разработки достаточно сложных математических моделей, позво-

ляющих рассчитать интенсивность протекания этих явлений.

В качестве альтернативных способов решения поставленной задачи моделирования процесса лазерной очистки можно рассмотреть получение на основе экспериментальных данных приближенных формул определения уносимой толщины поверхностного слоя при тепловом разрушении или применение методов молекулярной динамики.

## Problems of mathematical modeling of laser cleaning in industry

I. I. Golovin<sup>1)</sup>, I. V. Tsegelnik<sup>2)</sup>, S. I. Plankovskii<sup>3)</sup>

<sup>1), 2), 3)</sup> National Aerospace University of N.E. Zhukovsky "HAI", 17, Chkalov Str, Kharkov, Ukraine 61070

The purpose of this article is to analyze existing approaches to mathematical modeling of processes accompanying laser cleaning of the workpiece surface to determine the best practices in their modeling. The widespread use of lasers for industrial cleaning and expensive experimental equipment are forced to search for alternative ways to study this problem. The problems arising from attempts to model the interaction of laser radiation with a removable material were considered and made an attempt to generalize mathematical description of the processes of laser heating and destruction. The analysis, using analytical methods of investigation identified the shortcomings of existing approaches for modeling of laser cleaning and determined the most appropriate direction for their further studies.

**Keywords:** ablation, the lacquer coating, the phase transition, the method of molecular dynamics.

## Проблеми математичного моделювання процесів лазерного очищення в промисловості

І. І. Головін<sup>1)</sup>, Є. В. Цегельник<sup>2)</sup>, С. І. Планковський<sup>3)</sup>

<sup>1), 2), 3)</sup> Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «ХАІ», вул. Чкалова 17, м. Харків, Україна, 61070

Метою цієї статті є аналіз існуючих підходів до математичного моделювання процесів, що супроводжують лазерне очищення поверхні деталі для визначення раціональних методів при їх моделюванні. Широке застосування лазера для цілей промислового очищення й дорожняча експериментального обладнання змушують шукати альтернативних способів дослідження цієї проблеми.

У статті розглянуті проблеми, що виникають при спробах моделювання процесів взаємодії лазерного випромінювання з речовиною, що потребує видалення, й здійснена спроба узагальнення опису математичних процесів лазерного нагрівання й руйнування. У результаті аналізу при використанні аналітичних методів дослідження, були виявлені недоліки існуючих підходів при моделюванні процесів лазерного очищення й визначені найбільш прийнятні напрямки їх подальшого дослідження.

**Ключові слова:** абляція, лакофарбове покриття, фазовий перехід, метод молекулярної динаміки.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Вибір джерела лазерного випромінювання для цілей промислового очищення деталей авіаційної техніки [Текст] / С. І. Планковський, Є. В. Цегельник,

І. І. Головін, П. І. Мельничук // Наукоємні технології. – 2014. – № 4 (24). – С. 503 – 507.

2. Кузнецов П. М. Механизмы и закономерности форми-

рования эрозионного факела и волнового рельефа на поверхности металлов в зоне воздействия лазерного излучения [Текст] : дис. ... канд. физ.-мат. наук : 01.04.07 : защищена 26.06.2014 : утв. 18.09.2014 / Кузнецов Петр Михайлович. – Тамбов, 2014. – 132 с.

3. Взаимодействие лазерного излучения с веществом (силовая оптика) [Текст] / В. П. Вейко, М. Н. Либенсон, Г. Г. Червяков, Е. Б. Яковлев. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 312 с.

4. Действие мощных световых потоков на металлы [Текст] / С. И. Анисимов, А. М. Бонч-Бруевич, М. Я. Ельашевич [и др.] // Журнал технической физики. – 1966. – Т. 36, В. 7. – С. 1273 – 1284.

5. Действие излучения большой мощности на металлы [Текст] / С. И. Анисимов, Я. А. Имас, Г. С. Романов, Ю. В. Ходыко. – М. : Наука, 1970. – 272 с.

6. Рэди Дж. Действие лазерного излучения [Текст] ; пер. с англ. / Дж. Рэди. – М. : Мир, 1974. – 468 с.

7. Вейко В. П. Лазерная обработка [Текст] / В. П. Вейко, М. Н. Либенсон. – Л. : Лениздат, 1973. – 191 с.

8. Разрушение металлов под действием излучения оптического квантового генератора [Текст] : отчет о НИР / Ин-т физики АН БССР ; рук. М. А. Ельашевич – Минск, 1963. – № КЭ – 14. – 260 с.

9. Анисимов С. И. Избранные задачи теории лазерной абляции [Текст] / С. И. Анисимов, Б. С. Лукьянчук // Успехи физических наук. – 2002. – Т. 172, № 3. – С. 301 – 333.

10. Физическая энциклопедия [Текст] / под ред. А. М. Прохорова. – М. : Советская энциклопедия, 1988. – Т. 3. – С. 347 – 349.

11. Nepomnyashchy A. A. Convective flows in a two-layer system with a temperature gradient along the interface [Текст] / A. A. Nepomnyashchy, I. B. Simanovskii // Physics of Fluids. – 2006. – Vol. 18, Iss. 6. – P. 032105-1-7.

12. Лойцянский, Л.Г. Механика жидкости и газа [Текст] ; учеб. пособие / Л. Г. Лойцянский. – М. : Дрофа, 2003. – 840 с.

## REFERENCES

1. Plankovskyy, S. I., Tsegelnyk, Ye.V., Golovin, I.I., & Melnychuk, P. I. (2014). Vybir dzherela lazernoho viprominiuvannia dlia tsylei promyslovoho ochyshchennia detalei aviatsiinoyi tehniky [The choice of laser sources for the purposes of industrial cleaning equipment aviation equipment]. Naukoyemni tehnologii – Knowledge based technology, 4 (24), 503 – 507 [in Ukrainian].

2. Kuznetsov, P. M. (2014). Mekhanizmy i zakonornosti formirovaniia erozionnoho fakela i volnovoho reliefa na poverkhnosti metallov v zone vozdeistviia lazernoho izlucheniia [The mechanisms and regularities of erosion torch and wave pattern on the surface of the metal in the area of laser irradiation]. Candidate's thesis. Tambov [in Russian].

3. Veyko, V. P., Libenson, M. N., Cherviakov, H. H., & Yakovlev, Ye. B. (2008). Vzaimodeistviie lazernoho izlucheniia s veshchestvom (silovaia optika) [Interaction of laser radiation with matter (power optics)]. Moscow: FIZMATLIT [in Russian].

4. Anisimov, S. I., Bonch-Bruевич, A. M., Yeliashevich, M. Ya. et al. (1966). Deistviie moshchnikh svetovikh potokov na metalli [The action of powerful light streams in metals]. Zhurnal tekhnicheskoi fiziki – Journal of Technical Physics, 36, 7, 1273 – 1284 [in Russian].

5. Anisimov, S. I., Imas, Ya. A., Romanov, G. S., & Khodyko, Yu. V. (1970). Deistviie izlucheniia bolshoi moshchnosti na metalli [The effect of radiation of high power metal]. Moscow: Nauka [in Russian].

6. Redy, J. (1974). Deistviie lazernoho izlucheniia [Effects of laser radiation]. Moscow: Mir [in Russian].

13. Zahn, J.D. Two phase micromixing and analysis using electrohydrodynamic instabilities [Текст] / J. D. Zahn, V. Reddy // Microfluidics and Nanofluidics. – 2006. – Vol. 2, Iss. 5. – P. 399 – 415.

14. Bostanjoglo O. Hydrodynamic instabilities in laser pulse-produced melts of metal films [Текст] / O. Bostanjoglo, T. Nink // Journal of Applied Physics. – 1996. – Vol. 79, Iss. 11. – P. 8725 – 8729.

15. Григорьянц А. Г. Лазерная сварка металлов [Текст] / А. Г. Григорьянц, И. Н. Шиганов. – М. : Высшая школа, 1988. – 207 с.

16. Мисюрюв А. И. Технология лазерной наплавки [Текст] / А. И. Мисюрюв, Б. М. Федоров, И. Н. Шиганов. – М. : Изд. МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. – 40 с.

17. Бойко В. И. Модификация металлических материалов импульсными мощными пучками частиц [Текст] / В. И. Бойко, А. Н. Валяев, А. Д. Погребняк // Успехи физических наук. – 1999. – Т. 169, № 11. – С. 1243 – 1271.

18. Маненков А. А. Лазерное разрушение прозрачных твердых тел [Текст] / А. А. Маненков, А. Ж. Прохоров // Успехи физических наук. – 1986. – Т. 148, № 1. – С. 179 – 208.

19. Мирзоев Ф. Х. Лазерное управление процессами в твердом теле [Текст] / Ф. Х. Мирзоев, В. Я. Панченко, Л. А. Шелепин // Успехи физических наук. – 1996. – Т. 166, № 1. – С. 3 – 32.

20. Моделирование короткоимпульсной лазерной абляции методом молекулярной динамики: механизмы эжекции материала и формирования наночастиц [Текст] / Л. В. Жигилей [и др.] // Синтез наноразмерных материалов при воздействии мощных потоков энергии на вещество : монография / А. В. Булгаков [и др.]. – Новосибирск : ИТ СО РАН, 2009. – Гл. 7. – С. 147 – 220.

7. Veyko, V. P., & Libenson, M. N. (1973). Lazernaia obrabotka [Laser treatment]. Leningrad: Lenizdat [in Russian].

8. Yeliashevich, M. A. (1963). Razrushenie metallov pod deistviem izlucheniia opticheskoho kvantovoho heneratora [The destruction of the metal under the action of radiation in the optical maser]. Research Report. Minsk [in Russian].

9. Anisimov, S. I., & Lukiianchuk, B. S. (2002). Izbrannie zadachi teorii lazernoi abliatsii [Selected problems of laser ablation theory]. Uspekhi fizicheskikh nauk – Successes of physical sciences, 172, 3, 301 – 333 [in Russian].

10. Prokhorov, A. M. (Eds.). (1988). Fizicheskaiia entsiklopediia [Physical encyclopedia]. Vol. 3. Moscow: Sovetskaia entsiklopediia [in Russian].

11. Nepomnyashchy, A. A., & Simanovskii, I. B. (2006). Convective flows in a two-layer system with a temperature gradient along the interface. Physics of Fluids, 18, 6, 032105-1-7.

12. Loitsianskii, L. H. (2003). Mekhanika zhidkosti i haza [Fluid Mechanics]. Moscow: Drofa [in Russian].

13. Zahn, J. D., & Reddy, V. (2006). Two phase micromixing and analysis using electrohydrodynamic instabilities. Microfluidics and Nanofluidics, 2, 5, 399 – 415.

14. Bostanjoglo, O., & Nink, T. (1996). Hydrodynamic instabilities in laser pulse-produced melts of metal films. Journal of Applied Physics, 79, 11, 8725 – 8729.

15. Hrihoriantz, A. H., & Shihanov, I.N. (1988). Lazernaia svarka metallov [Laser welding of metals]. Moscow: Visshaia shkola [in Russian].

16. Misiurov, A. I., Fedorov, B. M., & Shihanov, I. N. (2004). Tekhnologiya lazernoi naplavki [The technology of laser cladding]. Moscow: Izd. MGTU im. N. E. Baumana [in Russian].
17. Boiko, V.I., Valiaev, A.N., & Pohrebniak, A.D. (1999). Modifikatsiia metallicheskih materialov impulsnymi moshchnymi puchkami enerhii [Metal modification by high-power pulsed particle beams]. Uspekhi fizicheskikh nauk – Successes of physical sciences, 169, 11, 1243 – 1271 [in Russian].
18. Manenkov, A. A., & Prokhorov, A. Zh. (1986). Lazernoe razrushenie prozrachnykh tverdykh tel [Laser damage in transparent solids]. Uspekhi fizicheskikh nauk – Successes of physical sciences, 148, 1, 179 – 208 [in Russian].
19. Mirzoev, F. Kh., Panchenko, V. Ya., & Shelepin, L. A. (1996). Lazernoe upravlenie protsessami v tverdom tele

[Laser control processes in solids]. Uspekhi fizicheskikh nauk – Successes of physical sciences, 166, 1, 3 – 32 [in Russian].

20. Zhihilei, L. V. et al. (2009). Modelirovanie korotkoimpulsnoi lazernoi abliatsii metodom molekuliarnoi dinamiki: mekhanizmi ezheksii materiala i formirovaniia nanochastits [Simulation of short-pulse laser ablation method of molecular dynamics: the material ejection mechanisms and the formation of nanoparticles]. Sintez nanorazmerikh materialov pri vozdeistvii moshchnikh potokov enerhii na veshchestvo – The synthesis of nanoscale materials under the influence of powerful energy flows on the substance. Bulhakov, A. V. et al. (Vol. 7). Novosibirsk: IT SO RAN [in Russian].



## Розроблення процесу сушіння паливних брикетів потоком атмосферного повітря з одночасним охолодженням

С. Л. Семірненко<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Сумський національний аграрний університет, вул. Герасима Кондратьєва, 160, м. Суми, Україна, 40000

### Article info:

Paper received:

21 May 2015

The final version of the paper received:

06 November 2015

Paper accepted online:

30 November 2015

### Correspondent Author's Address:

<sup>1)</sup> semirnenko@yandex.ua

Україна має досить значний потенціал солом'яної біомаси, доступної для виробництва екологічно чистої енергії. Тому перспективним напрямком досліджень є використання соломи як місцевого палива. Ефективність перероблення даної біомаси в енергетичну продукцію досягається лише за раціональних параметрів технологічних процесів і машин. Подальшої активізації потребують дослідження зі зниження витрат на виготовлення та зниження техногенного навантаження на довкілля за рахунок удосконалення технології виготовлення паливних брикетів із соломи. Тому метою дослідження є підвищення ефективності процесу виготовлення паливних брикетів із солом'яної біомаси за рахунок максимального використання їх власного тепла.

На основі емпіричних і теоретичних досліджень була розроблена схема та наведена методика розрахунку процесу сушіння паливних брикетів із застосуванням їх власного тепла, що утворилося під час виготовлення. Подальші дослідження в цьому напрямку дадуть можливість знизити витрати на технологічний процес виробництва паливних брикетів із солом'яної біомаси, знизити їх собівартість, сприяти збільшенню ККД установок для спалювання брикетів і відповідно зменшенню шкідливих викидів в атмосферу.

**Ключові слова:** солом'яна біомаса, сушіння, схема, розрахунок, ступені, випаровування, вологість, температура, повітря, тепло, витрати.

## ВСТУП

Україна має досить значний потенціал солом'яної біомаси, доступної для виробництва екологічно чистої енергії. Але солома має низку особливостей. Найбільш важливою паливно-технологічною характеристикою біомаси, яку використовують як тверде біопаливо, є теплота згоряння, що істотно знижується при збільшенні вологості біопалива [1]. Спалювання соломи підвищеної вологості є недопустимим із точки зору техногенного впливу на довкілля, і тому обов'язковою умовою використання біомаси з енергетичною метою є доведення її вологості до значення, яке забезпечує найбільш повне згоряння.

### Аналіз останніх досліджень та публікацій.

Незважаючи на накопичені наукові здобутки та значний практичний досвід у сфері технології утилізації біомаси, що відобразилися у працях вітчизняних та зарубіжних дослідників, серед яких В. Мальтри, А. Долінський, Г. Гелетуха, Т. Железна, Г. Голуб та ін. [1, 2, 3, 4], перспективним напрямком досліджень для України є використання соломи як місцевого палива, що розглядається як вирішення екологічних, енергетичних та економічних проблем.

Аналіз зарубіжних та вітчизняних джерел дозволяє стверджувати, що найенергоємнішим етапом

технологічного процесу виробництва твердого палива є попереднє сушіння сировини, що займає 34,2% загальних енерговитрат. Крім того, сушіння подрібненої біомаси є пожежонебезпечною ділянкою технологічного процесу [5, 6].

Типова технологія виготовлення брикетів, що застосовується в нашій країні, передбачає сушіння солом'яної біомаси після її подрібнення і подальше брикетування. Під час охолодження брикетів проходить процес безповоротної утилізації відібраного від брикетів тепла [4].

Запропонована у працях В. А. Войтова, І. Б. Вороновського, В. Бунецького [5, 6] технологія виготовлення паливних брикетів без сушіння солом'яної біомаси за рахунок застосування тонкого її помелу до 100–50 мкм призводить до збільшення витрат енергії на подрібнення.

Виділенню не вирішених раніше складових загальної проблеми присвячується ця стаття.

Із аналізу наукових досліджень та огляду технічних засобів, які існують для охолодження і сушіння брикетів, установлено, що на сьогодні не розроблені достатньою мірою способи і режими охолодження і сушіння паливних брикетів із біомаси, які дозволили б створити установку, що виконує не лише інтенсивне охолодження, а й інтенсивне сушіння.

Ефективність перероблення біомаси в енергетичну продукцію досягається лише за раціональних параметрів технологічних процесів і машин. Подальшої активізації потребують дослідження зі зниження витрат на виготовлення та зниження технологічного навантаження на докільця за рахунок удосконалення технології виготовлення паливних брикетів із соломи.

### Формування цілей статті

Метою досліджень є підвищення ефективності процесу виготовлення паливних брикетів із солом'яної біомаси за рахунок максимального використання їх власного тепла.

## ОСНОВНА ЧАСТИНА

Процеси охолодження та сушіння можна поділити на декілька етапів.

Гарячі брикети з преса потрапляють на апарат для охолодження та сушіння, який поділений на два ступені.

На першому ступені брикети сушаться за рахунок одержаного в результаті пресування тепла під час обдування їх повітряним потоком, що створює вентилятор. Для підвищення ефективності сушіння брикетів забір повітря вентилятором виконується через шар гарячих брикетів із вузла завантаження паливних брикетів. На першому ступені, крім сушіння, відбувається інтенсивне охолодження брикетів.

На другому ступені брикети сушаться за рахунок залишкового тепла брикетів та повітряного потоку, що надходить з першого ступеня. За високої вологості брикетів підвищення температури повітряного потоку для забезпечення висушування до оптимальної вологості в другій зоні забезпечується електрокалорифером (за потреби). Висушені брикети надходять до вузла завантаження паливних брикетів, де відбувається їх інтенсивне охолодження за рахунок проходження потоку атмосферного повітря.

Основний принцип процесу сушіння може бути поданий у вигляді схеми (рис. 1).

### РОЗРАХУНОК ПЕРШОГО СТУПЕНЯ АПАРАТА

Об'єктом поетапних розрахунків є визначення середньої температури теплоносія на виході брикетів із першого ступеня та маси води, що випарюється. Для розрахунків беремо, що енергія брикетів, яка виділяється в ході зниження їх температури, витрачається на підігрівання повітря, яке їх омиває, і на випаровування вологи брикетів.

Поверхня тепловіддачі одиничного брикета  $F$ , м<sup>2</sup> визначається як

$$F = \pi \cdot d_{бр} \cdot L_{бр} + \pi \cdot d_{бр}^2/2, \quad (1)$$

де  $d_{бр}$  – діаметр брикету, м;

$L_{бр}$  – довжина брикету, м.

Сушіння проводиться на рухомому кулачковому транспортері.

Рівняння передачі теплоти  $Q$ , кДж, одиничним брикетом

$$Q = F \cdot \alpha \cdot \Delta t_{сер} \cdot \tau, \quad (2)$$

де  $\alpha$  – розмірний коефіцієнт тепловіддачі, кВт/(м<sup>2</sup>·К);

$\tau$  – експериментальний час перебування брикету в зоні первинної сушіння, с;

$\Delta t_{сер}$  – середня різниця температур між потоком повітря і стінкою брикету, К.

$$\Delta t_{сер} = [(t_{c1} - t_0) + (t_{c1} - t_{k1})]/2, \quad (3)$$

де  $t_{c1}$  – середня температура поверхні брикетів на 1-му ступені апарата, °С;

$t_0$  – температура повітря на вході в перший ступінь апарату, °С;

$t_{k1}$  – температура повітря, що підлягає визначенню на виході з 1-го ступеня апарата, °С.

Рівняння розрахунку кількості теплоти,  $Q$ , кДж, одержаного потоком повітря за час  $\tau$  від одного брикету на першому ступені апарата, має вигляд

$$Q = M_{взд} \cdot C_{взд} (t_{k1} - t_0) \quad (4)$$

де  $C_{взд}$  – теплоємність повітря, кДж/кг·К.

Маса повітря  $M_{взд}$ , кг, що підігрівається, омиваючи один брикет, на першому ступені апарата за час  $\tau$

$$M_{взд} = s \cdot w \cdot \rho_{взд} \cdot \tau, \quad (5)$$

де  $s$  – площа перерізу потоку повітря при обтіканні брикета у вузькому місці, м<sup>2</sup>;

$\rho_{взд}$  – густина повітря підігрітого за рахунок охолодження брикетів, кг/м<sup>3</sup>;

$w$  – швидкість потоку повітря у вузькому місці між брикетами, м/с.

Можна записати:

$$Q = Q_{пвзд}, \quad (6)$$

де  $Q_{пвзд}$  – кількість теплоти, що витрачається на підігрівання конвекцією зовнішнього потоку повітря за час проходження брикета через перший ступінь апарата, кДж;

$$Q_{пвзд} = \Delta H_{бр} - H_{пвод}, \quad (7)$$

де  $\Delta H_{бр}$  – загальна кількість тепла, віддана брикетом на випаровування внутрішньої води і на підігрівання конвекцією зовнішнього повітряного потоку за час перебування брикета на першому ступені апарата, кДж:

$$\Delta H_{бр} = H_{брк0} - H_{брк1}. \quad (8)$$

Знаходимо ентальпію підсушеного брикета на виході з першого ступеня апарата, кДж:

$$H_{брк1} = [m_{сc} \cdot C_{сc} + m_{вод1} \cdot C_{вж} + m_{взд1} \cdot C_{взд}] \cdot t_{брк1}, \quad (9)$$

де  $m_{сc}$  – маса сухої соломи, кг;

$C_{сc}$  – теплоємність сухої соломи, кДж/кг·К;

$m_{вод1}$  – маса вільної води в брикетах на виході з першого ступеня, кг;

$C_{вж}$  – теплоємність рідкої води, кДж/кг·К;

$m_{взд1}$  – маса сухого повітря, кг;

$C_{взд}$  – теплоємність повітря, кДж/кг·К;

$t_{брк1}$  – середня температура брикета після першого ступеня апарата.

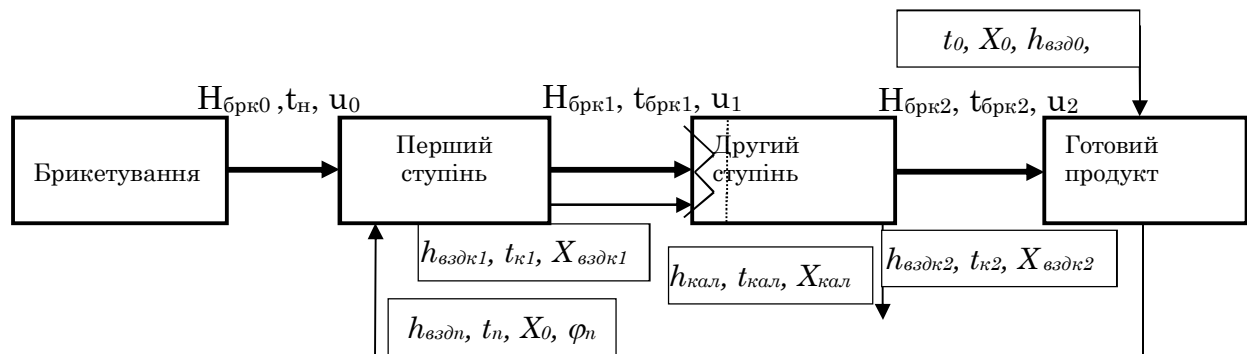


Рисунок 1 – Схема процесу сушіння паливних брикетів із відповідними параметрами на кожному етапі:  $t_n$ ,  $t_{брк1}$ ,  $t_{брк2}$  ( $t_0$ ,  $t_n$ ,  $t_{к1}$ ,  $t_{кал}$ ,  $t_{к2}$ ) – температура брикета (повітря),  $^{\circ}\text{C}$ ;  $H$  – ентальпія брикета,  $\text{kJ/kg}$ ;  $u$  – вологовміст брикета;  $X$  – вологовміст повітря,  $\text{kg/kg}$ ;  $h$  – ентальпія повітря,  $\text{kJ/kg}$ ;  $\phi$  – відносна вологість повітря, % (на відповідних етапах)

Ентальпія парів води, що дифундують із брикета в повітряний потік,  $\text{kJ}$ :

$$H_{\text{пвод}} = h_{\text{тс}} \cdot d_{\text{мв1}}, \quad (10)$$

де  $h_{\text{тс}}$  – питома ентальпія парів води, що дифундує з підсушеного брикета за температури стінки брикета після першого ступеня апарата,  $\text{kJ/kg}$ ;

$d_{\text{мв1}}$  – маса води, що видаляється з брикету на першій ступені апарату за рахунок теплової енергії, яка вноситься гарячим брикетом,  $\text{kg}$ .

Поряд із випаровуванням води за рахунок тепла внесеного брикетом, певне випаровування здійснюється за рахунок потенціальної енергії, що вноситься повітрям, яке стискається у вентиляторі. У шарі брикетів потік повітря здійснює роботу тертя, у результаті чого виділяється певна кількість теплоти, що витрачається на випаровування вологи. Проявляється дія додаткового джерела тепла. Загальну потужність додаткового джерела енергії, яка вноситься повітрям в апарат, рекомендується розраховувати за встановлюваною потужністю електродвигуна з поправкою на ККД двигуна і втратою теплової енергії через корпус вентилятора у довкілля.

Підвищення температури повітря  $\Delta t_{\text{в}}$ ,  $^{\circ}\text{C}$ , вентилятором наближено визначаємо:

$$\Delta t_{\text{в}} = 0,8 \cdot 10^{-3} \cdot W_{\text{ед}} / L_{\text{в}}, \quad (11)$$

де  $W_{\text{ед}}$  – встановлювальна потужність електродвигуна вентилятора,  $\text{Wt}$ ;

$L_{\text{в}}$  – продуктивність вентилятора,  $\text{m}^3/\text{s}$ .

Теплова потужність вентиляторна  $Q_{\text{ед}}$ ,  $\text{Wt}$ , передана потоку повітря:

$$Q_{\text{ед}} = 0,8 \cdot W_{\text{ед}}. \quad (12)$$

Перетворення потенціальної енергії потоку в теплоту залежить від зміни швидкості потоку повітря в квадраті, тому беремо, згідно з попередніми дослідженнями, що на першому ступені апарату виділяється у формі тепла лише 70 % загальної енергії потоку.

Теплова потужність додаткового джерела теплоти  $Q_{\text{пв1}}$ ,  $\text{Wt}$ , що діє в брикеті за рахунок зміни

параметрів потоку повітря і впливає на процес випаровування:

$$Q_{\text{пв1}} = 0,7 \cdot Q_{\text{ед}}. \quad (13)$$

Додаткова кількість енергії  $q_{\text{пвбр}}$ ,  $\text{kJ}$ , що підводиться кожному брикету, за рахунок зміни параметрів потоку повітря

$$q_{\text{пвбр}} = Q_{\text{пв1}} \cdot \tau / n, \quad (14)$$

де  $n$  – кількість брикетів, що висушуються за 1 годину.

Оцінювання кількості вологи  $d_{\text{мпв1}}$ , що видаляється з брикета за рахунок дії додаткового джерела теплоти проводиться за співвідношенням

$$d_{\text{мпв1}} = q_{\text{пвбр}} / h_{\text{тс}}, \quad (15)$$

Загальна кількість вологи, що видаляється з брикета на 1-му ступені апарата,  $\text{kg}$

$$d_{\text{тобц1}} = d_{\text{мв1}} + d_{\text{мпв1}}. \quad (16)$$

Підвищення вологовмісту повітря  $\Delta X_1$  на виході з першої ступені апарату,  $\text{kg/kg}$  сухого повітря

$$\Delta X_1 = d_{\text{тобц1}} / M_{\text{взд}}. \quad (17)$$

Вологовміст повітря  $X_{\text{вздк1}}$  на виході з першого ступеня апарата,  $\text{kg/kg}$  сухого повітря

$$X_{\text{вздк1}} = X + \Delta X_1. \quad (18)$$

Питома ентальпія вологого повітря на виході з 1-го ступеня апарата,  $\text{kJ/kg}$

$$h_{\text{вздк1}} = (C_{\text{взд}} + X_{\text{вздк1}} \cdot C_{\text{пв}}) \cdot t_{к1} + r_{к1} \cdot X_{\text{вздк1}}, \quad (19)$$

де  $C_{\text{пв}}$  – теплоємність парів води,  $\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$ ;

$r_{к1}$  – питома теплота пароутворення за кінцевої температури потоку,  $\text{kJ/kg}$ .

## РОЗРАХУНОК ДРУГОГО СТУПЕНЯ АПАРАТА

Середній вміст води в брикетах  $m_{\text{вод1}}$  на вході в другий ступінь апарата,  $\text{kg}$ :



$$m_{\text{вод}1} = m_{\text{вод}} - d_{\text{мобн}1} \quad (20)$$

де  $m_{\text{вод}}$  – маса вільної води в брикеті, кг.

Кількість води  $\Delta m_{\text{вод}2}$ , яку необхідно видалити з кожного брикета на другому ступені апарату:

$$\Delta m_{\text{вод}2} = m_{\text{вод}1} - m_{\text{вод}2} \quad (21)$$

де  $m_{\text{вод}2}$  – після 2-го ступеня апарату міститься вільної води у брикеті, кг.

Підвищення вологовмісту повітря, яке виходить із другого ступеня під час руху брикетів в один шар:

$$\Delta X_2 = \Delta m_{\text{вод}2} / M_{\text{взд}} \quad (22)$$

Кінцевий вологовміст повітря на виході з другого ступеня апарату, кг/кг:

$$X_{\text{взд}2} = X_{\text{взд}1} + \Delta X_2 \quad (23)$$

Згідно з експериментальними даними задаємося температурою брикетів на вході в другий ступінь та температурою потоку повітря.

Проведені розрахунки показали, що при максимальній вологості брикетів у системі недостатньо власної теплової енергії для висушування брикетів до вихідної вологості. Тому перед подачею повітря із першого ступеня апарату на другий вводять додаткове його підігрівання від зовнішнього джерела, наприклад в електрокалорифері. За вологості брикетів нижче максимальної визначається необхідна потужність електрокалорифера, а за необхідності він може бути відключеним. Контроль проводять за значенням вологості готової продукції (висушених брикетів). Критерієм відключення є вихідна вологість паливних брикетів 14 %, яка забезпечує ефективність спалювання та довготривале зберігання брикетів.

Таким чином, для процесу досушування брикетів на другому ступені витрачається тепло від трьох джерел. Перше джерело тепла функціонує за рахунок охолодження брикетів (від залишкового тепла брикетів після 1-го ступеня). Друге джерело тепла проявляється за рахунок підведення тепла брикетам від підігрітого повітря. Третє джерело тепла є наслідком деградації механічної енергії потоком повітря, яка через роботу тертя перетворюється в теплову енергію. Це додаткове джерело тепла порівняно малопотужне.

Щоб забезпечити на другому ступені апарату спрямованість вектора потоку тепла від повітря до брикетів, задано, що кінцева температура відпрацьованого повітря буде вищою від кінцевої температури брикетів на 3 градуси.

Після прийняття зазначених припущень проводимо розрахунки, які дозволять визначити температуру, до якої необхідно підігрівати повітря після першого ступеня перед подачею на другий ступінь апарату.

Питома ентальпія вологого повітря на виході з другого ступеня апарату, кДж/кг:

$$h_{\text{взд}2} = (C_{\text{взд}} + X_{\text{взд}2} \cdot C_{\text{пв}}) \cdot t_{\text{к}2} + r_{\text{к}2} \cdot X_{\text{взд}2}, \quad (24)$$

де  $t_{\text{к}2}$  – температура відпрацьованого повітря на виході з 2-го ступеня апарату, °C;

$r_{\text{к}2}$  – питома теплота пароутворення за відпо-

відної температури, °C, брикетів на виході з другого ступеня, кДж/кг.

Ентальпія висушеного брикета  $H_{\text{брк}2}$ , кДж, за відповідної температури, °C, брикетів на виході з 2-го ступеня апарату

$$H_{\text{брк}2} = [m_{\text{сс}} \cdot C_{\text{сс}} + m_{\text{вод}2} \cdot C_{\text{вж}} + m_{\text{взд}2} \cdot C_{\text{взд}}] \cdot t_{\text{брк}2}. \quad (25)$$

Складаємо тепловий баланс для процесу сушіння одного брикета на другому ступені апарату. надходження тепла:

$$Q_{\text{прих}} = Q_{\text{взд}1} + Q_{\text{брк}1} + Q_{\text{пвм}2} + Q_{\text{подог}}, \quad (26)$$

де  $Q_{\text{взд}1}$  – теплота, що надходить із повітрям, що омиває брикет на виході з 1-го ступеня апарату, кДж

$$Q_{\text{взд}1} = M_{\text{взд}} \cdot h_{\text{взд}1}, \quad (27)$$

де  $Q_{\text{брк}1}$  – теплота, що надходить із брикетом із 1-го ступеня при відповідній його температурі на виході з 1-го ступеня, кДж:

$$Q_{\text{брк}1} = H_{\text{брк}1}, \quad (28)$$

де  $Q_{\text{пвм}2}$  – теплота перетворення механічної енергії потоку повітря в теплову енергію на 2-му ступені апарату

$$Q_{\text{пвм}2} = Q_{\text{пв}2} \cdot \tau / n, \quad (29)$$

де  $\tau$  – експериментальний час перебування брикета в зоні вторинного сушіння (дорівнює часу перебування в зоні первинного сушіння), с;

$n$  – число брикетів, що висушуються за 1 годину;

$Q_{\text{подог}}$  – теплота, яку необхідно підвести від зовнішніх підігрівачів повітря перед подачею його на 2 ступінь апарату для реалізації процесу досушування одиночного брикету, кДж.

Витрати тепла

$$Q_{\text{расх}} = Q_{\text{взд}2} + Q_{\text{брк}2}, \quad (30)$$

де  $Q_{\text{взд}2}$  – теплота, що виводиться з 2-го ступеня апарату з відпрацьованим повітрям, кДж:

$$Q_{\text{взд}2} = M_{\text{взд}} \cdot h_{\text{взд}2}; \quad (31)$$

де  $Q_{\text{брк}2}$  – теплота, виведена сухими брикетами з 2-го ступеня апарату за відповідної температури брикетів, °C:

$$Q_{\text{брк}2} = H_{\text{брк}2}. \quad (32)$$

Визначаємо питому ентальпію підігрітого повітря на вході в 2-й ступінь апарату:

$$h_{\text{вздн}2} = Q_{\text{взд}2} / M_{\text{взд}}. \quad (33)$$

Розрахунок питомої ентальпії повітря після підігрівача, кДж/кг:

$$h_{\text{кал}} = (C_{\text{взд}} + X_{\text{взд}1} \cdot C_{\text{пв}}) \cdot t_{\text{кал}} + r_{\text{н}2} \cdot X_{\text{кал}}, \quad (34)$$

де  $t_{\text{кал}}$  – температура підігрітого повітря на вході в другий ступінь апарату, °C;

$r_{\text{н}2}$  – питома теплота пароутворення за  $t_{\text{кал}}$ , кДж/кг;

$X_{\text{кал}}$  – вологовміст повітря  $X_{\text{взд}1}$  на виході з першого ступеня апарату.

Визначення загальної потужності додаткового нагрівача  $W_{\text{под}}$ , кВт:

$$W_{\text{под}} = Q_{\text{подог}} \cdot n / 3600. \quad (35)$$

Необхідність використання додаткового нагрівача визначаємо за вхідною і вихідною вологістю брикетів.

## ВИСНОВКИ

У результаті аналізу теоретичних та експериментальних досліджень охолодження і сушіння паливних брикетів запропонована схема процесу сушіння паливних брикетів із соломи із застосуванням їх власного тепла, що приведе до зменшення витрат на сушіння.

Для забезпечення досушування брикетів, виготовлених із соломи підвищеної вологості, запропонована методика визначення температури та вологості брикетів на кожній стадії процесу сушіння, а також потужності додаткового джерела енергії (електрокалорифера), необхідного для досушування брикетів, що гарантує ефективність спалювання та довготривале зберігання брикетів.

Подальшої активізації потребують дослідження з удосконалення способу переміщення брикетів у зоні сушіння, що підвищить ефективність виробництва паливних брикетів із біомаси.

## The development of the process of drying fuel briquettes using flow of air with a simultaneous cooling

S. L. Semirnenko<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> *Sumy National Agrarian University, St. Gerasim Kondratyev street, 160, Sumy, Ukraine, 40000*

Ukraine has a great potential of biomass straw, which is available for the production of clean energy. Therefore, a promising area of research is the use of straw as a local fuel. The efficiency of the biomass processing for energy production is achieved only under the rational parameters of processes and machines. The studies on the reduction of the production costs and the reduction of the anthropogenic impact on the environment by improving the technology of manufacturing fuel briquettes from straw require further intensification. Therefore, the aim of the research is to increase the efficiency of the manufacturing process of fuel briquettes from straw biomass by maximizing the use of its own heat.

Based on empirical and theoretical studies, a scheme describing a method of process of drying fuel briquettes using their own heat generated during manufacture was developed. That makes possible to reduce the cost of the technological process of manufacturing straw briquettes from biomass, reduce their production cost, help to increase the coefficient of efficiency of combustion plants and briquettes, respectively, to reduce harmful emissions.

**Keywords:** straw biomass, drying, briquettes, circuit calculation, rate, evaporation, humidity, temperature, air, heat, costs.

## Разработка процесса сушки топливных брикетов потоком атмосферного воздуха с одновременным охлаждением

С. Л. Семирненко<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> *Сумский национальный аграрный университет, ул. Герасима Кондратьева, 160, г. Сумы, Украина, 40000*

Украина имеет достаточно большой потенциал соломенной биомассы, доступной для производства экологически чистой энергии. Поэтому перспективным направлением исследований является использование соломы в качестве местного топлива. Эффективность переработки данной биомассы в энергетическую продукцию достигается только при рациональных параметрах технологических процессов и машин. Дальнейшей активизации требуют исследования по снижению затрат на изготовление и снижению техногенной нагрузки на окружающую среду за счет совершенствования технологии изготовления топливных брикетов из соломы. Поэтому целью исследования является повышение эффективности процесса изготовления топливных брикетов из соломенной биомассы за счет максимального использования собственного тепла.

На основе эмпирических и теоретических исследований была разработана схема и приведена методика расчета процесса сушіння топливных брикетов с применением их собственного тепла, образовавшегося при изготовлении. Это дает возможность снизить затраты на технологический процесс производства топливных брикетов из соломенной биомассы, снизить их себестоимость, способствовать увеличению КПД установок для сжигания брикетов и соответственно уменьшению вредных выбросов в атмосферу.

**Ключевые слова:** соломенная биомасса, сушіння, схема, расчет, ступени, испарение, влажность, температура, воздух, тепло, расходы.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Голуб Г. А. Теплота згоряння та умови спалювання соломи / Г. А. Голуб, В. О. Лук'янець, С. В. Субота // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. – 2009. – Вип. 134, ч. 2. – С. 275 – 278.
2. Долінський А. А. Енергозбереження та екологічні проблеми енергетики / А. А. Долінський // Вісник НАН України. – 2006. – № 2. – С. 24 – 32.
3. Гелету́ха Г. Г. Комплексний аналіз технологій виробництва енергії з твердої біомаси в Україні. Частина 1. Солома / Г. Г. Гелету́ха, Т. А. Железна, О. І. Дроздова // Промышленная теплотехника. – 2013. – № 3. – С. 56 – 63.
4. Мальтри В. Сушильные установки сельскохозяйственного назначения / В. Мальтри, Э. Пётке, Б. Шнайдер; пер. с нем. В. М. Комиссаров, Ю. Л. Фрегер; под ред. В. Г. Евдокимова. – М. : Машиностроение, 1979. – 525 с.
5. Войтов В. А., Вороновский И.Б. Пути снижения энергозатрат при производстве твердого топлива в виде брикетов или пеллет / В. А. Войтов, И. Б. Вороновский // Науковий вісник ТДАТУ. – 2012. – Вип. 2, Том 5. – С. 77 – 83.
6. Бунецкий В. О. Аналіз технологічних процесів отримання твердого палива у вигляді пелет або брикетів / В. О. Бунецкий // Вісник ЦНЗ АПВ Харківської області. – 2011. – Вип. 10. – С. 328 – 340.

## REFERENCES

1. Golub, G. A. (2009) *Teplota zgoryannya ta umovy spaluvannya solomy nogo universy tetu bioresursiv i pry rodokory stuvannya Ukrayiny*.
2. Dolins'ky`j A.A. (2006) *Energozberezhennya ta ekologich-ni problemy energetyky. Visnyk NAN Ukrayiny.* – # 2.
3. Geletuxa G. G. (2013) *Kompleksnyj analiz texnologij vy`robny`cztva energiyi z tverdoyi biomasy` v Ukrayini. Chasty`na 1. Soloma Promyshlennaia teplotekhnika ka.* – # 3.
4. Maltri V. (1979) *Sushilnye ustanovki selskohoz'astven-nogo naznachen'ia per. s nem. V.M. Komissarov, Ju.L. Freger: pod red. V.G. Evdokimova. M.: Mashinostroenie.* [in Russian].
5. Voytov, V.A., Voronovskiy, I.B. (2012) *Puti snizheniya energozatrat pri proizvodstve tverdogo topliva v vide briketov ili pellet [Ways to reduce energy consumption in the production of solid fuel in the form of briquettes or pellets] Naukoviy visnyk TDAU, Vip. 2, 5, 77–83* [in Russian].
6. Bunetskiy, V. O. (2011). *Analiz tekhnolohichnykh protsesiv otrymannya tverdoho palyva u vyhlyadi pelet abo bryketiv Visnyk TsNZ APV Kharkivskoi oblasti. Vyp. 10. 328–340.*



УДК 621.763+620.168:666.3.017

## Влияние геомодификатора на структуру и свойства механически активированного политетрафторэтилена

К. В. Берладир<sup>1)</sup>, А. Ф. Будник<sup>2)</sup>, В. А. Свицерский<sup>3)</sup>, О. А. Будник<sup>4)</sup>, П. В. Руденко<sup>5)</sup>

<sup>1), 2), 5)</sup> Сумский государственный университет, ул. Римского-Корсакова, 2, Сумы, Украина, 40007

<sup>3)</sup> Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», просп. Победы, 37, г. Киев, Украина, 03056

<sup>4)</sup> Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, ул. Костюкова, 46, г. Белгород, Россия, 308012

### Article info:

Paper received:

27 May 2015

The final version of the paper received:

27 October 2015

Paper accepted online:

30 November 2015

### Correspondent Author's Address:

<sup>2)</sup> info@pmtkm.sumdu.edu.ua

Совокупностью физических методов исследований изучены особенности процесса механической активации матричного политетрафторэтилена. Показано повышение физико-механических и эксплуатационных свойств и структурирующей активности ПТФЭ за счет механической активации. Добавление геомодификатора к активированной матрице ПТФЭ повышает эксплуатационные свойства полученного композита. Для более активного взаимодействия ПТФЭ - геомодификатор необходимы дополнительные исследования в направлении технологических аспектов повышения адгезионной активности связи ингредиентов композиции и свойств.

**Ключевые слова:** политетрафторэтилен, матрица, каолин-геомодификатор, надмолекулярная структура, химические связи, физико-механические и эксплуатационные свойства, механическая активация, адгезионная активность.

## ВВЕДЕНИЕ

Модифицирование матричного политетрафторэтилена (ПТФЭ) компонентами различного состава, природы, морфологии и дисперсности – эффективное направление современного полимероведения в совершенствовании функциональных полимерных композитов, так как позволяет устранять негативные особенности чистого ПТФЭ: значительную хладотекучесть и низкую износостойкость вследствие физико-химических процессов в зоне фрикционного взаимодействия [1].

Наряду с традиционными наполнителями все более широкое распространение в качестве функциональных модификаторов при создании композиционных материалов на основе ПТФЭ приобретают компоненты природного происхождения - геомодификаторы, к которым относят слюды, глины, трепел, шунгит [2]. Различное кристаллохимическое строение природных наполнителей предусматривает образование дисперсных частиц с различными морфологическими особенностями.

В соответствии с предыдущими исследованиями [3] в качестве дисперсных наполнителей выбраны каолины, которые значительно отличаются по минералогическому и химическому составу, а соответственно и по активности поверхности.

Полимерные матрицы, наполненные дисперсными наполнителями, являются гетерогенными систе-

мами, в которых структура слоя на границе раздела отличается от структуры исходного полимера. Характерные поверхностные явления на границе фаз - хемосорбция, адсорбция, адгезионная взаимодействие, релаксационные процессы - определяют параметры деформационно-прочностных и структурных характеристик граничного слоя и композита в целом [4].

Обеспечение оптимального уровня взаимодействия матричного полимера и частиц наполнителя определяет структуру и характеристики граничных слоев. Оно затруднено вследствие специфического строения молекулярной цепи ПТФЭ, что обуславливает выраженную химическую инертность к большому числу твердофазных компонентов, а практически отсутствие вязкотекучего состояния не способствует смачиванию поверхностного слоя частиц модификатора-наполнителя.

Физической основой структурного модифицирования полимеров является изменение условий протекания процессов кристаллизации и формирования надмолекулярной структуры полимера при изменении активности и содержания модифицирующих наполнителей и интенсивности внешнего энергетического воздействия на ингредиенты композиции в целом.

В связи с характерным молекулярным и надмолекулярным строением ПТФЭ наиболее распространенными и эффективными методами активации его

структурного строения является механохимическое воздействие в высокоэнергетических установках [5] и модифицирование наполнителями различной природы [6].

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Объектами исследований являются ПТФЭ торговой марки Ф-4-ПН (ГОСТ 10007), в качестве геомодификатора - каолина марок КС-1 Глуховецкого (Винницкая обл.) и Просьянского (Днепропетровская обл.) месторождений, а также композиты на основе ПТФЭ.

Композицию ПКМ получали сухим смешением навесок компонентов в лопастном смесителе МРП-1М. Образцы материалов для испытаний готовили по технологии холодного прессования (давление прессования  $P_{пр} = 50,0 - 70,0$  МПа с последующим свободным спеканием таблетированных заготовок на воздухе при  $(365 \pm 5)$  °С со скоростью нагрева - охлаждения 40 °С/ч.

Исследование свойств композита включало определение плотности  $\rho$  (г/см<sup>3</sup>), прочности при разрыве  $\sigma_p$  (МПа), относительного удлинения  $\delta$  (%) и интенсивности изнашивания  $I \cdot 10^{-6}$  (мм<sup>3</sup>/Н·м) в соответствии с нормативными документами.

Испытания на прочность и относительное удлинение при разрыве проводили на кольцевых образцах диаметрами  $\phi 50 \times \phi 40$  и высотой 10 мм с помощью жестких полудисков (ГОСТ 11262) на разрывной установке Р-1 (ГОСТ 4651) при скорости движения ползуна 0,25 см/мин.

Интенсивность изнашивания материалов исследовали на серийной машине трения СМТ-1 по схеме «частичный вкладыш-вал».

Величину износа образцов определяли гравиметрически на аналитических весах с точностью до 10<sup>-5</sup> грамм и пересчитывали на интенсивность изнашивания по известным методикам. Изучение надмолекулярной структуры ПТФЭ композитов проводили на сканирующем электронном микроскопе высокого разрешения TESCAN MIRA 3 LMU.

Обработку экспериментальных данных осуществляли методами математического планирования эксперимента и математической статистики.

## 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБСУЖДЕНИЕ

Активация порошка ПТФЭ проводилась сухим помолом в мельнице МРП-1М с разной частотой вращения рабочих органов в интервале  $n = 5000 - 9000$  мин<sup>-1</sup> и в течение экспериментально определенного интервала времени  $\tau = 3 - 8$  мин.

Найдено, что оптимальные показатели соотношения физико-механических и триботехнических свойств имеет активированный ПТФЭ при режиме  $n = 9000$  мин<sup>-1</sup> на протяжении 5 минут: прочность при разрыве в этом случае  $\sigma_p = 24,8$  МПа, относительное удлинение  $\delta = 415$  %, интенсивность изнашивания  $I = 610 \cdot 10^{-6}$  мм<sup>3</sup>/Н·м.

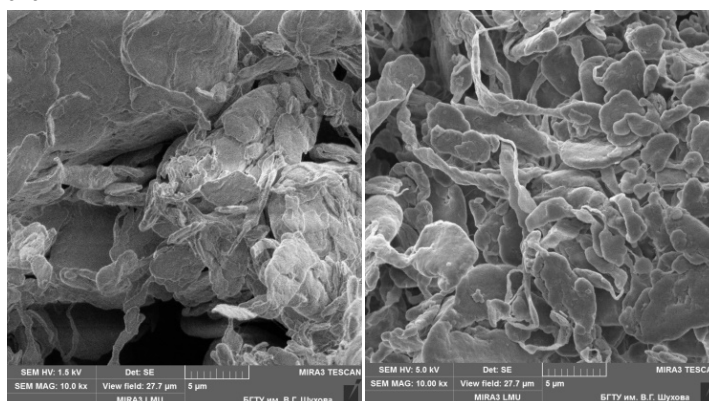
У неактивированного полимера  $\sigma_p = 9,5$  МПа,  $\delta = 96$  %,  $I = 1133 \cdot 10^{-6}$  мм<sup>3</sup>/Н·м [7], т. о. показатели свойств у активированного ПТФЭ выше на 25 – 50 %,

что доказывает эффективность такого технологического приема повышения свойств ПТФЭ.

С целью изучения особенностей процессов структурной модификации ПТФЭ при механохимической активации и введении дисперсных геомодификаторов, их влияния на фазовый состав, параметры надмолекулярной структуры и физико-механические свойства композитов, проведены исследования получаемых структур композиционных материалов методами электронной микроскопии.

На микрофотографиях идентифицируются частицы наполнителя и надмолекулярные образования активированной матрицы, характер которых зависит от концентрации наполнителя.

Во всем концентрационном диапазоне наполнения композиты имеют однофазную структуру, подобную структуре чистого ПТФЭ, но более пористую (рис. 1).



а)

б)

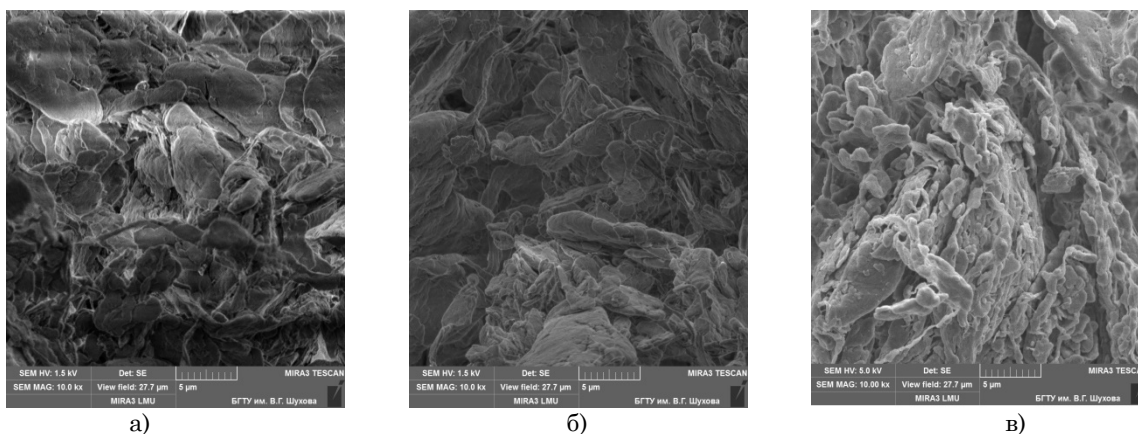
Рисунок 1 - Микроструктура ПТФЭ композита с наполнителем из каолина КС-1: а) Глуховецкого месторождения, б) Просьянского месторождения

При увеличении концентрации наполнителя надмолекулярная структура матрицы становится более рыхлой и дефектной, увеличивается количество микропустот (рис. 2), наблюдаются отдельные частицы каолина, которые отделены от матрицы микротрещинами вдоль всей поверхности частицы.

Увеличение концентрации наполнителя приводит также к агрегатированию частиц каолина. Эти изменения проявляются особенно заметно при концентрациях геомодификатора выше 6 % масс. Указанные изменения морфологии надмолекулярной структуры матрицы при введении каолина свидетельствуют о недостаточном уровне структурной активности каолинов как наполнителя и отсутствии устойчивой адгезионной связи между матрицей и наполнителем.

Композиты, разработанные на основе активированной матрицы ПТФЭ и каолина, имеют более высокие показатели свойств, чем с неактивированной матрицей (табл. 1).

Приведенные в таблице результаты испытаний позволяют сделать вывод о более эффективной модификации матрицы ПТФЭ каолином КС-1 из Просьянского месторождения.



а)

б)

в)

Рисунок 2 - Микроструктура ПТФЭ композита с каолином КС-1 Глуховецкого месторождения при его содержании (масс. %): а) 2; б) 4; в) 6

Таблица 1 - Свойства ПТФЭ композитов, наполненных каолином марки КС-1 различного происхождения

Номер обр.	Состав композита	Плотность $\rho$ , г/см <sup>3</sup>		Прочность при разрыве $\sigma_r$ , Мпа		Относительное удлинение $\delta$ , %		Интенсивность изнашивания $I \cdot 10^{-6}$ , мм <sup>3</sup> /Н·м	
		акт.	неакт.	акт.	неакт.	акт.	неакт.	акт.	неакт.
1	98 % ПТФЭ + + 2 % КС-1 (Просьянский)	2,18	2,19	16,6	15,0	409	350	10,80	11,95
2	98 % ПТФЭ + + 4 % КС-1 (Просьянский)	2,17	2,18	12,3	12,1	315	295	11,75	12,50
3	98 % ПТФЭ + + 6 % КС-1 (Просьянский)	2,16	2,17	13,8	13,5	445	420	12,95	13,45
4	98 % ПТФЭ + + 2 % КС-1 (Глуховецкий)	2,18	2,19	14,5	13,1	344	310	11,59	12,35
5	96 % ПТФЭ + + 4 % КС-1 (Глуховецкий)	2,17	2,18	10,6	10,5	273	250	12,90	13,50
6	94 % ПТФЭ + + 6 % КС-1 (Глуховецкий)	2,16	2,17	12,2	12,1	363	330	13,60	13,98
7	80 % ПТФЭ + 20 % кокс (контроль)	2,18	2,19	15,9	14,6	380	340	12,65	13,50

Проведенные исследования выявили, что механически активированный полимер с каолином не взаимодействует, т. е. в полимерном композите ПТФЭ/каолин компоненты не связаны между собой химическими связями. Вероятнее всего эта связь осуществляется за счет Ван-дер-Ваальсовых сил, что позволяет получить композиты с необходимыми физико-механическими свойствами.

## ВЫВОДЫ

Проведенные исследования двойной системы активированный ПТФЭ/каолин позволяют сделать следующие основные выводы:

1. Механически активированный ПТФЭ имеет более высокие (в 2,6 - 4,3 раза) значения физико-механических и триботехнических свойств, чем неактивированный.

2. Каолин КС-1 Просьянского месторождения более реакционноспособный к формированию однородной структуры ПТФЭ композита с необходимыми эксплуатационными свойствами.

3. Частицы наполнителя из каолина располагаются преимущественно в аморфных областях матрицы ПТФЭ, усиливая структуру композита.

4. Умеренные значения эксплуатационных свойств ПТФЭ композита с каолином обусловлены относительно невысокой адгезионной способностью наполнителя и, очевидно, требуют дополнительных технологических приемов для ее повышения, в т. ч. технологическими методами энергетического воздействия как при подготовке ингредиентов, так и получении композиции.

5. Проведенные исследования подтвердили практическую возможность использования каолинов - геомодификаторов при получении композиции с требуемыми свойствами на основе активированного ПТФЭ.

## Effect of the geomodifier on properties and structure of mechanically activated polytetrafluoroethylene

K. V. Berladir<sup>1)</sup>, A. F. Budnik<sup>2)</sup>, V. A. Sviderskiy<sup>3)</sup>, O. A. Budnik<sup>4)</sup>, P. V. Rudenko<sup>5)</sup>

<sup>1), 2), 5)</sup> Sumy State University, 2, Rimsky Korsakov Str., 40007, Sumy, Ukraine

<sup>3)</sup> National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Victory avenue, 37, m. Kyiv, Ukraine, 03056

<sup>4)</sup> Belgorod State Technological University of V. Shukhov, 46, Str. Kostyukova, Belgorod, Russia, 308012

Peculiarities of the mechanical activation process matrix PTFE are investigated by the set of physical research methods. The increasing physical-mechanical and operational properties and structure-activity of PTFE due to mechanical activation is shown. Addition of geomodifier to the activated matrix of PTFE improves the operational properties (in 2,6 – 4,3 times) of the obtained composite. Studies have confirmed the feasibility of using kaolin - geomodifiers in preparing the compositions with the desired properties based on the activated PTFE. More active interaction of PTFE - geomodifier requires extensive research in the direction of the technological aspects of increasing the adhesive bond and properties of composition ingredients.

**Key words:** polytetrafluoroethylene, matrix, kaolin-geomodifiers, supramolecular structure, chemical connections, physical-mechanical and operational properties, mechanical activation, adhesion activity.

## Вплив геомодифікаторів на структуру і властивості механічно активованого політетрафторетилену

К. В. Берладир<sup>1)</sup>, А. Ф. Будник<sup>2)</sup>, В. А. Свидерський<sup>3)</sup>, О. А. Будник<sup>4)</sup>, П. В. Руденко<sup>5)</sup>

<sup>1), 2), 5)</sup> Сумський державний університет, вул. Римського-Корсакова, 2, м. Суми, Україна, 40007

<sup>3)</sup> Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», просп. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056

<sup>4)</sup> Белгородський державний технологічний університет ім. В. Г. Шухова, вул. Костюкова 46, м. Белгород, Росія, 308012

Сукупністю фізичних методів досліджень вивчені особливості процесу механічної активації матричного політетрафторетилену. Показано підвищення фізико-механічних та експлуатаційних властивостей і структуровальної активності ПТФЕ за рахунок механічної активації. Додавання геомодифікаторів до активованої матриці ПТФЕ підвищує експлуатаційні властивості одержаного композиту. Для більш активної взаємодії ПТФЕ-геомодифікаторів необхідні додаткові дослідження у напрямку технологічних аспектів підвищення адгезійної активності зв'язку інгредієнтів композиції і властивостей.

**Ключові слова:** політетрафторетилен, матриця, каолін-геомодифікатори, надмолекулярна структура, хімічні зв'язки, фізико-механічні та експлуатаційні властивості, механічна активація, адгезійна активність.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Машков Ю. К. Трибофизика и свойства наполненного фторопласта / Ю. К. Машков. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 1997. – 192 с.

2. Мікульюнок І. О. Термопластичні композитні матеріали та їх наповнювачі: класифікація та загальні відомості / І. О. Мікульюнок // Хімічна промисловість України. - 2005. - № 5. - С. 30 - 39.

3. Сикорский А. А. Реологическое поведение водных суспензий каолина в присутствии поверхностно-активных веществ / А. А. Сикорский, А. В. Миролюк, В. А. Свидерский // Технологический аудит и резервы производства. – 2013. - № 2/1 (10). – С. 45 - 48.

4. Липатов Ю. С. Физико-химические основы наполнения полимеров / Ю. С. Липатов. – М. : Химия, 1991. – 260 с.

5. Фізико-хімічні аспекти механічної активації політетрафторетиленової композиції при отриманні та рециклінгу / А. Ф. Будник, Х. В. Берладир, В. А. Свидерський, О. А. Будник, П. В. Руденко, А. А. Ільїних // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2014. – № 2/11 (68). – С. 9 - 15.

6. Будник О. А. Физико-химические и технологические аспекты подготовки углеволокнистого наполнителя для композита на основе политетрафторэтилена / О. А. Будник // Научно-теоретический журнал «Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова». – 2014. - № 2. - С. 116 - 122.

7. Структурные изменения матрицы ПТФЭ - композитов / О. А. Будник, К. В. Берладир, А. Ф. Будник, П. В. Руденко // Научно-теоретический журнал «Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова». – 2015. - № 4. - С. 104 - 112.

## REFERENCES

1. Mashkov, Yu.K. (1997). Teplofizika i svoystva napolnennogo ftoroplasta [Thermophysics and properties of filled polytetrafluorethylene]. Omsk: Izd-vo OmGTU [in Russian].
2. Mikulonok, I.O. (2005). Termoplastychni kompozytni materialy ta yikh napovnyuvachi: klasyfikatsiya ta zahal'ni vidomosti [Thermoplastic composite materials and their filler: classification and general information]. Khimichna promyslovisht' Ukrayiny - Chemical industry of Ukraine, 5, 30-39 [in Ukrainian].
3. Sikorsky, A.A., Myronyuk, A.V., Sviderskiy, V.A. (2013). Reolohycheskoe povedeniye vodnykh suspenzyi kaolyna v prysutstviy poverkhnostno-aktyvnykh veshchestv [The rheological behavior of aqueous suspensions of kaolin in the presence of surfactants]. Tekhnologicheskyy audit i rezervy proizvodstva - Technological audit of production and reserves, 2/1, 45-48 [in Russian].
4. Lipatov, Yu.S. (1991). Fiziko-khimicheskiye osnovy napolneniya polimerov [Physico-chemical basis of filled polymers]. Moskva: Khimiya [in Russian].
5. Budnik, A.F., Berladir, K.V., Sviderskiy, V.A., Budnik, O.A., Rudenko, P.V., Ilyinh, A.A. (2014). Fizyko-khimichni aspekty mekhanichnoyi aktyvatsiyi politetraftoretylenovoyi kompozytsiyi pry otrymanni ta retsyklinhu [Physico-chemical aspects of mechanical activation politetraftoretylenovoyi composition receipt and recycling]. Vostochno-evropeyskyy z0hurnal peredovykh tekhnolohyy - Eastern European Journal of advanced technologies, 2/11, 9-15 [in Ukrainian].
6. Budnik, O.A. (2014). Fiziko-khimicheskiye i tekhnologicheskyye aspekty podgotovki uglevoloknistogo napolnitelya dlya kompozita na osnove politetraftoretilena [Physical-chemical and technological aspects of the preparation of carbon fiber filler for composite based on PTFE]. Nauchno-teoreticheskyy zhurnal «Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova» - Scientific-theoretical journal "Bulletin of BSTU V.G. Shukhov", 2, 116-122 [in Russian].
7. Budnik, O.A., Berladir, K.V., Budnik, A.F., Rudenko, P.V. (2015). Strukturnyye izmeneniya matritsy PTFE – kompozitov [Structural changes PTFE matrix - composites]. Nauchno-teoreticheskyy zhurnal «Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova» - Scientific-theoretical journal "Bulletin of BSTU V.G. Shukhov", 4, 104-112 [in Russian].





## Інтелектуальна система прогнозування зниження продуктивності віртуальних машин у середовищі хмарних обчислень

В. В. Москаленко<sup>1)</sup>, С. В. Пімоненко<sup>2)</sup>

<sup>1), 2)</sup> Сумський державний університет, вул. Римського-Корсакова, 2, м. Суми, Україна, 40007

### Article info:

Paper received:

17 May 2015

The final version of the paper received:

24 November 2015

Paper accepted online:

30 November 2015

### Correspondent Author's Address:

<sup>1)</sup> systemscoders@gmail.com

У статті в рамках інформаційно-екстремальної інтелектуальної технології розглядається аналіз та синтез системи прогнозування зниження продуктивності віртуальних машин на спільній фізичній інфраструктурі внаслідок їх конкуренції за ресурси. Запропоновано формування вхідного математичного опису системи шляхом кластер-аналізу метрик продуктивності віртуальних машин та метрик використання ресурсів. Як ознаки розпізнавання стану зниження продуктивності системи розглядаються кількість розміщених на хості віртуальних машин кожного класу споживання ресурсів та обсяг вільних ресурсів процесора, оперативної та дискової пам'яті і мережевого каналу. Розроблені алгоритми ґрунтуються на адаптивному двійковому кодуванні ознак розпізнавання та оптимізації геометричних параметрів розбиття простору ознак на класи еквівалентності у процесі максимізації інформаційної спроможності системи оцінювання функціонального стану обчислювального середовища. Як критерій оптимізації запропоновано використовувати модифікацію інформаційної міри Кульбака, що є функціоналом від помилки другого роду та першої достовірності прийняття рішень.

**Ключові слова:** віртуальна машина, хмарні обчислення, машинне навчання, клас розпізнавання, словник ознак, інформаційний критерій, прогнозування, оптимізація.

## ВСТУП

Провайдери хмар використовують технології віртуалізації, які дозволяють розділяти ресурси фізичних машин між багатьма віртуальними машинами, що належать різним арендаторам. Сумісне користування ресурсами сприяє підвищенню ефективності використання хмарної ІТ-інфраструктури і скороченню витрат на обслуговування. При цьому надання хмарних послуг може бути реалізоване відповідно до однієї з бізнес-моделей – оплата в міру споживання (Pay as you go) або передплата зарезервованих ресурсів (Reservation Pool). Система керування хмарною інфраструктурою повинна забезпечувати якість обслуговування (Quality of Service) клієнтів, хмари та максимізацію використання введених до експлуатації ресурсів. Рівень якості обслуговування залежить від своєчасності реагування на запити додаткових ресурсів та на ознаки зниження продуктивності додатків, що розміщені на віртуальних машинах. Зменшення простою ресурсів пов'язане як із реалізацією оверселінгу (Overselling), що полягає у перепродажі незадіяних (проте зарезервованих) ресурсів, так і з динамічною оптимізацією розміщення віртуальних машин [1-3]. При цьому система керування ІТ-інфраструктурою повинна вирішувати завдання енергозбереження шляхом розвантаження і вимкнення живлення слабозавантажених фізичних машин та попередження зниження продуктивності віртуальних машин, що розміщені на хостовому сер-

вері з високим рівнем утилізації ресурсів. Основною причиною зниження продуктивності віртуальних машин, що працюють на спільній інфраструктурі апаратного забезпечення, є їх недостатня ізоляція. Ефект змагання віртуальних машин за різні фізичні ресурси ще називають «інтерференцією». Інтерференція виникає на рівні апаратних компонентів, таких як процесори, пам'ять, засоби введення - виведення та мережевий канал, і підсилюється їх спільним впливом [3, 4]. Прогнозування зниження продуктивності віртуальних машин дозволяє підтримувати заданий рівень обслуговування SLA (Service Level Agreement) шляхом врахування відповідної інформації при міграції існуючих чи розміщенні нових віртуальних машин на фізичних хостових серверах. Повторюваний характер завдань, що вирішуються додатками віртуальних машин, забезпечує можливість застосування методів машинного навчання для аналізу log-даних трасування роботи віртуальних машин і синтезу моделі прогнозування рівня їх інтерференції. Проте багатовимірність спостережень за функціональним станом гетерогенного обчислювального середовища обумовлює перетин класів розпізнавання в просторі ознак і невисоку достовірність вирішальних правил, одержаних за допомогою традиційних методів аналізу даних.

**Мета статті** – запропонувати в рамках інформаційно-екстремальної інтелектуальної технології метод інформаційного синтезу високдостовірних ви-

рішальних правил для прогнозування рівнів інтерференції віртуальних машин при різних комбінаціях їх розміщення на фізичних серверах.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Нехай подано апріорно некласифікований набір векторів спостереження за роботою віртуальних машин  $\{v_i^{(j)} \mid j = \overline{1, n}; i = \overline{1, N}\}$  та алфавіт класів споживання ресурсів  $\{T_k^o \mid k = \overline{1, K}\}$ , що характеризує типи задач, які вирішуються на основі цих віртуальних машин. При цьому клас  $T_1^o$  є базовим і відповідає мінімальному рівню споживання ресурсів пам'яті, процесора та каналу мережі. Для різних варіантів комбінації розміщення віртуальних машин, що належать до різних класів споживання ресурсів  $\{.. \mid k = \overline{1, K}\}$ , на фізичних серверах задано алфавіт образів  $\{I_c^o \mid c = \overline{1, C}\}$ , що характеризує рівень інтерференції віртуальних машин на спільній апаратній інфраструктурі, і відповідну апріорно класифіковану навчальну матрицю типу об'єкт-властивість  $\{y_{c,i}^{(j)} \mid j = \overline{1, n}; i = \overline{1, N}; c = \overline{1, C}\}$ . Клас  $I_1^o$  є базовим і відповідає нульовому рівню інтерференції. Відома структура вектора параметрів функціонування системи прогнозування рівня інтерференції:

$$g = \langle \delta_{T,i}, \delta_{I,i}, x_m, d_m \rangle, \quad (1)$$

де  $\delta_{T,i}, \delta_{I,i}$  – параметри поля контрольних допусків для  $i$ -ї ознаки класифікаторів віртуальних машин (за ознаками споживання ресурсів) та рівня інтерференції відповідно;  $x_m$  – двійковий еталонний вектор класу  $X_m^o \in \{T_k^o\} \cup \{I_c^o\}$ , що визначає геометричний центр його гіперсферичного контейнера;  $d_m$  – кодовий радіус контейнера класу  $X_m^o \in \{T_k^o\} \cup \{I_c^o\}$ , що побудований в радіальному базисі бінарного простору ознак.

При цьому задано такі обмеження:  $d(x_m \oplus x_{cm}) > d_m$ , де  $d(x_m \oplus x_{cm})$  – кодова відстані між двійковим еталонним вектором класу  $X_m^o$  та двійковим еталонним вектором сусіднього до нього класу  $X_{cm}^o$ ;  $\delta_{T,i} \in [0; \delta_{\max}]$ ,  $\delta_{I,i} \in [0; \delta_{\max}]$ .

Необхідно в процесі навчання системи прогнозування рівня інтерференції визначити оптимальні значення координат вектора параметрів функціонування  $g^*$  (1), що забезпечують максимальне значення усередненого за алфавітом класів розпізнавання інформаційного КФЕ:

$$\bar{E} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \max_{G_E} \{E_m\}. \quad (2)$$

Необхідно в робочому режимі системи прогнозування рівня інтерференції прийняти рішення про належність розміщених на фізичному сервері віртуальних машин до відповідних класів споживання ресурсів з алфавіту  $\{T_k^o\}$  та про відповідність даної

комбінації розміщення віртуальних машин одному з класів алфавіту рівнів інтерференції  $\{I_c^o\}$ .

## АЛГОРИТМ ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМИ ПРОГНОЗУВАННЯ ЗНИЖЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ ВІРТУАЛЬНИХ МАШИН

Навчання системи прогнозування рівнів інтерференції за даними трасування роботи віртуальних машин запропоновано починати з формування в процесі кластер-аналізу алфавіту класів віртуальних машин залежно від їхнього середнього рівня споживання різного типу фізичних ресурсів. При цьому словник ознак класифікатора віртуальних машин повинен включати середній обсяг використання ресурсу процесорів, оперативної пам'яті, файла підкачування, мережевого каналу, дискового простору, середню інтенсивність операцій введення-виведення з дисковою пам'яттю. На другому етапі необхідно в процесі кластер-аналізу сформувати алфавіт рівнів інтерференції, де словник ознак включає записи про зміну у відсотках сумарного споживання різного типу ресурсів, зміну метрик продуктивності, відсоток помилок обробки задач на віртуальній машині, відсоток часу перебування процесора в стані блокування та інші зміни, викликані розміщенням нової віртуальної машини. Наступний крок аналізу даних передісторії полягає у зв'язуванні кожної знайденої комбінації розміщення віртуальних машин на фізичних серверах із відповідним класом рівня інтерференції  $I_c^o$ . Як ознаки можна розглядати кількість розміщених на хості віртуальних машин кожного класу  $T_k^o$  та метрики споживання ресурсів процесора, оперативної та дискової пам'яті і мережевого каналу.

Оптимізація геометричних параметрів вирішальних правил, що формуються у процесі інформаційно-екстремального кластер-аналізу спостережень за споживанням ресурсів і продуктивністю віртуальних машин, здійснюється в бінарному просторі вторинних ознак, перехід до якого здійснюється в процесі адаптивного двійкового кодування первинних ознак розпізнавання [5, 6]. При цьому нижня  $A_{H,i}$  та верхня  $A_{B,i}$  межі поля контрольних допусків для  $i$ -ї ознаки обчислюються за формулами:

$$A_{H,i} = y_{\max,i} - \delta_i, \quad A_{B,i} = y_{\max,i}, \quad (3)$$

де  $y_{\max,i}$  – максимальне значення обсягу використання  $i$ -го ресурсу віртуальною машиною в архівних даних моніторингу.

В алгоритмі інформаційно-екстремального машинного навчання з учителем, що призначений для формування вирішальних правил прогностичного класифікатора рівнів інтерференції межі поля контрольних допусків для  $i$ -ї ознаки обчислюються за такими формулами:

$$A_{H,i} = \bar{y}_{1,i} - \delta_i, \quad A_{B,i} = \bar{y}_{1,i} + \delta_i, \quad (4)$$

де  $\bar{y}_{1,i}$  – середнє значення  $i$ -ї ознаки в базовому класі.

Кодування ознак полягає у порівнянні їх числових значень  $y_{m,i}^{(j)}$  з верхнім  $A_{B,i}$  та нижнім  $A_{H,i}$  порогоми і формуванні навчальної матриці вторинних (бінарних) ознак  $\{x_{m,i}^{(j)} | i = \overline{1, N}; j = \overline{1, n}; m = \overline{1, M}\}$  за правилом

$$x_{m,i}^{(j)} = \begin{cases} 1, & \text{if } A_{H,i} \leq y_{m,i}^{(j)} \leq A_{B,i}; \\ 0, & \text{if else.} \end{cases} \quad (5)$$

Розглянемо основні етапи реалізації алгоритму інформаційно-екстремальної кластеризації даних моніторингу на  $M$  кластерів.

1. Формування множини двійкових векторів  $\{x^{(z)} | z = \overline{1, n'}\}$ , що є потенційними початковими центрами контейнерів, шляхом копіювання двійкової матриці  $\{x_i^{(j)}\}$ , видалення в ній однакових векторів та сортування решти векторів у порядку збільшення кількості одиничних координат.

2. Формування початкових центрів контейнерів  $\{x_m | m = \overline{1, M}\}$  за правилом

$$x_m = \begin{cases} x^{(1)}, m = 1; \\ x^{(n' \cdot [m-1]/[M-1])}, 1 < m < M; \\ x^{(n')}, m = M. \end{cases} \quad (6)$$

3. Кластер-аналіз двійкової матриці класу  $\{x_i^{(j)}\}$  за алгоритмом k-середніх [7] з використанням дистанційної міри Хеммінга та формування множини оптимальних центрів кластерів  $x_m^*$ .

4. Оптимізація радіуса контейнерів здійснюється за процедурою

$$d_m^* = \arg \max_{G_d \cap G_c} \bar{E}, \quad (7)$$

де  $G_d \in [0; d(x_m \oplus x_c) - 1]$  – область допустимих значень параметра  $d_m$ , що обмежена міжцентровою кодовою відстанню  $d(x_m \oplus x_c)$  до найближчого сусіднього кластера (класу)  $X_c^o$ ;  $G_n \in [80\%; 100\%]$  – область допустимих значень відсотка кластеризованих (охоплених контейнерами) векторів-реалізацій від загального обсягу.

Оптимізація параметра  $\delta = \delta_i, i = \overline{1, N}$  рецептивного поля, що реалізує механізм адаптивного двійкового кодування ознак, здійснюється за ітераційною процедурою [5, 6]

$$\delta^* = \arg \max_{G_\delta} \left\{ \frac{1}{M} \sum_{s=1}^M \left[ \max_{G_E \cap G_d} E_m \right] \right\}, \quad (8)$$

де  $G_\delta$  – область допустимих значень параметра рецептивного поля;  $G_E$  – допустима область визначення функції критерію (1), що обмежена нерівностями  $D_{1,m} \geq 0,5$  і  $D_{2,m} \geq 0,5$ ;  $E_m$  – критерій ефективно-

сті навчання класифікатора розпізнавати реалізації  $m$ -го класу.

Як критерій ефективності навчання (кластер-аналізу) розглядається модифікація інформаційної міри Кульбака [6], в якій відношення правдоподібності подане у вигляді відношення повної ймовірності правильного прийняття рішень  $P_{true}$  до повної ймовірності помилкового прийняття рішень  $P_{false}$ . Для випадку двох альтернативних і рівноймовірних гіпотез міра Кульбака має вигляд

$$J_m = \left[ P_{true,m} - P_{false,m} \right] \log_2 \frac{P_{true,m}}{P_{false,m}} = \left[ \begin{array}{l} P_{true,m} = 0,5D_{1,m} + 0,5D_{2,m} \\ P_{false,m} = 0,5\alpha_m + 0,5\beta_m \\ \alpha_m = 1 - D_{1,m}; D_{2,m} = 1 - \beta_m \end{array} \right] = \\ = [D_{1,m} - \beta_m] * \log_2 \left( \frac{1 + [D_{1,m} - \beta_m]}{1 - [D_{1,m} - \beta_m]} \right), \quad (9)$$

де  $D_{1,m}$  – перша достовірність для класу  $X_m^o$ ;  $D_{2,m}$  – друга достовірність;  $\alpha_m$  – помилка другого роду;  $\beta_m$  – помилка другого роду.

Для порівняльного аналізу результатів досліджень і під час оцінювання ступеню близькості реальної системи до потенційної доцільно використовувати нормовану модифікацію критерію, що подають у вигляді [5]:

$$E_m = \frac{J_m}{J_{\max}}, \quad (10)$$

де  $J_{\max}$  – значення критерію при  $D_{1,m} = 1$  та  $\beta_m = 0$ .

У режимі екзамену рішення про належність вектора-реалізації  $x^{(j)}$  одному з класів алфавіту  $\{X_m^o\}$  приймається шляхом обчислення геометричної функції належності

$$\mu_m = 1 - \frac{d(x_m^* \oplus x^{(j)})}{d_m^*}, \quad (11)$$

де  $d(x_m^* \oplus x^{(j)})$  – кодова відстань від етлонного вектора (центра контейнера) класу  $X_m^o$  до вектора  $x^{(j)}$ .

Таким чином, у процесі інформаційно-екстремального кластер-аналізу формується вхідний математичний опис для здатної навчатися системи прогнозування рівня інтерференції віртуальних машин на фізичному сервері хмарної інфраструктури. При цьому параметри функціонування прогностичного класифікатора визначаються шляхом ітераційної процедури пошуку глобального максимуму інформаційного критерію за Кульбаком у допустимій області визначення його функції.



## РЕЗУЛЬТАТИ ФІЗИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Розглянемо використання запропонованих алгоритмів на реальних даних моніторингу роботи хмарної інфраструктури. Для формування вхідного математичного опису системи прогнозування рівня інтерференції віртуальних машин було взято дані трасування роботи центрів обробки великих даних, що опубліковано компанією Google в 2011 році [8]. При цьому для формування вибірки спостережень, що відповідають різним рівням «інтерференції» віртуальних машин, фіксувалися такі події: задача спрямована планувальником на хостову машину для запуску; для завдання виконується перепланування (міграція); завдання виконане успішно. На основі цих подій визначалися моменти часу для розрахунку зміни метрик використання ресурсів і продуктивності відповідних віртуальних машин унаслідок конкуренції за ресурси. Ці самі моменти подій використовуються для зв'язування комбінацій розміщення віртуальних машин, які зустрічаються в передісторії, з відповідним рівнем інтерференції.

На рисунку 1 показано результати оптимізації кількості класів споживання ресурсів та класів інтерференції, що здійснюється у процесі інформаційно-екстремального кластер-аналізу спостережень за споживанням ресурсів та спостережень за змінами споживання і продуктивності. Обсяг апріорно неklasифікованих вибірок становить  $n=1000$ . При цьому за оптимальне значення кількості кластерів обирається те найбільше значення, яке забезпечує найбільш чітке розбиття простору ознак.

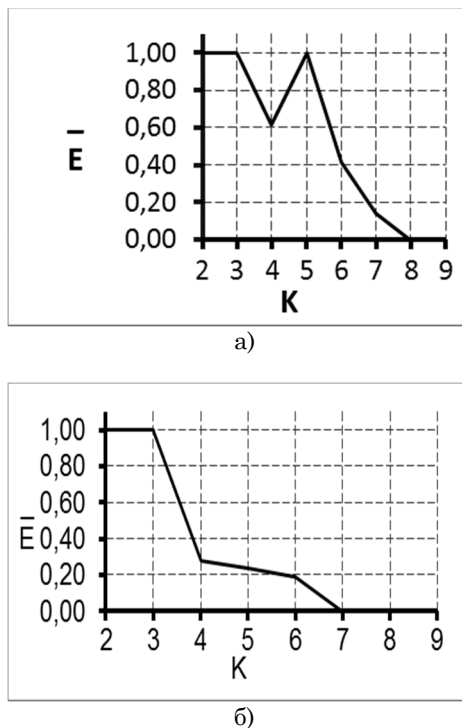


Рисунок 1 – Графік залежності усередненого нормованого інформаційного КФЕ від заданої кількості кластерів розбиття: а) на класи споживання ресурсів; б) на класи рівня інтерференції

Аналіз рис. 1 показує, що при обраному словнику ознак і обраній процедурі кодування ознак (3) оптимальна в інформаційному сенсі кількість класів споживання ресурсів віртуальної машини становить  $K^*=5$ . Оптимальна в інформаційному сенсі кількість класів інтерференції –  $C^*=3$ .

Наступним етапом є підрахунок кількості віртуальних машин кожного класу та обчислення усереднених значень обсягу споживання різного типу ресурсів на хостових машинах з метою формування вхідного математичного опису для прогностичного класифікатора рівнів інтерференції. Обсяг вибірок кожного класу в навчальній матриці становить  $n_c=70$ .

На рисунку 2 показано графіки залежності нормованого критерію Кульбака (6) від параметрів поля контрольних допусків  $\delta_T$  та  $\delta_I$ , одержаних у процесі навчання прогностичної системи за процедурою (4). На графіку (тут і далі) затемнена ділянка позначає робочу область визначення функції інформаційного критерію.

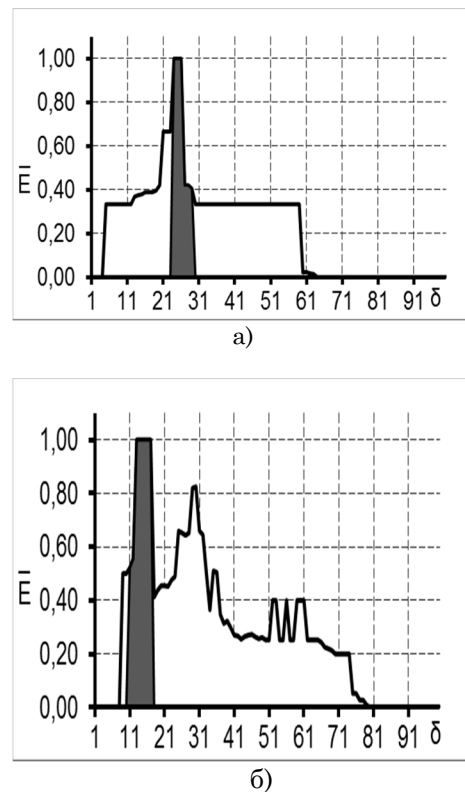
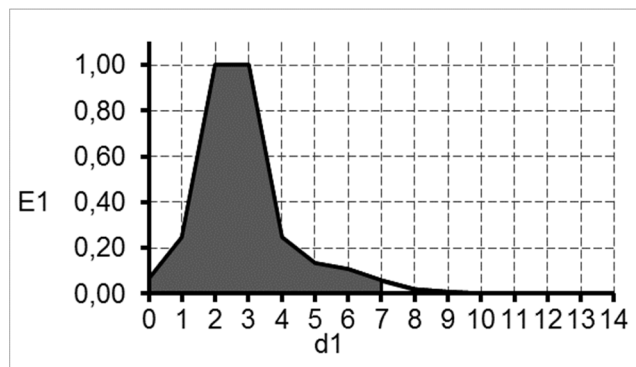


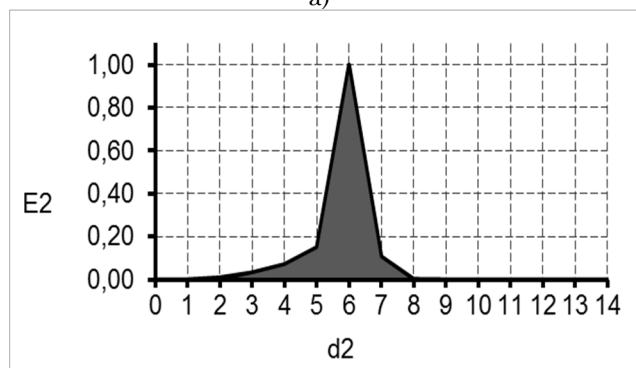
Рисунок 2 – Графік зміни усереднено нормованого КФЕ при оптимізації параметра поля контрольних допусків: а) параметр  $\delta_T$ ; б) параметр  $\delta_I$

Аналіз рис. 2 показує, що оптимальний параметр поля контрольних допусків на значення ознак класу споживання ресурсів дорівнює  $\delta_T^*=\pm 67\%$  при значенні максимуму усередненого критерію  $\bar{E}^*=1,0$ . Аналіз рис. 2б показує, що оптимальний параметр поля контрольних допусків на значення ознак класу ступеня інтерференції дорівнює  $\delta_I^*=\pm 35\%$  при значенні максимуму усередненого критерію  $\bar{E}^*=1,0$ . Оскільки метою інформаційно-екстремального на-

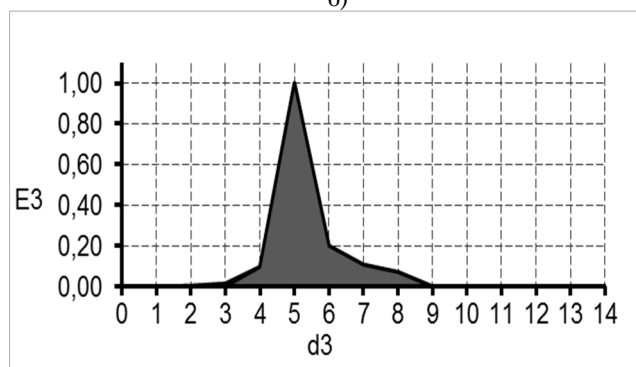
вчання є відновлення в просторі ознак оптимальних контейнерів класів розпізнавання, то на рис. 3 наведено графіки залежності нормованого КФЕ (6) від радіусів контейнерів класів  $I_1^o$ ,  $I_2^o$  та  $I_3^o$ .



а)



б)



в)

Рисунок 3 – Залежність КФЕ (6) від радіуса контейнера класу рівня інтерференції: а) клас  $I_1^o$ ; б) клас  $I_2^o$ ; в) клас  $I_3^o$

Аналіз рис. 3 показує, що оптимальні значення радіусів гіперсферичних контейнерів класів  $I_1^o$ ,  $I_2^o$  та  $I_3^o$  відповідно дорівнюють:  $d_1=15$ ,  $d_2=31$  та  $d_3=31$  (у кодових одиницях). При цьому вдалося побудувати безпомилкові за навчальною матрицею вирішальні правила.

Таким чином, на прикладі центрів обробки великих даних здійснено синтез безпомилкових за навчальною матрицею інформаційно-екстремальних вирішальних правил для передбачення зниження продуктивності віртуальних машин внаслідок їх конкуренції за ресурси на хостових серверах хмарної інфраструктури.

## ВИСНОВКИ

Отже, розроблений інформаційно-екстремальний алгоритм машинного навчання дозволяє одержати безпомилкові за навчальною матрицею вирішальні правила для передбачення конкуренції за ресурси віртуальних вузлів обробки великих даних.

Практична цінність одержаних результатів для хмарних обчислень полягає у формуванні інструменту попередження зниження продуктивності віртуальних машин у процесі оптимізації енерговитрат і підтримці заданого рівня обслуговування для користувачів хмарних сервісів.

## Intelligent system for predict performance degradation of virtual machines in cloud environment

V. V. Moskalenko<sup>1)</sup>, S. V. Pimonenko<sup>2)</sup>

<sup>1), 2)</sup> Sumy State University, 2, Rimsky Korsakov Str., 40007, Sumy, Ukraine

In this article the information-extreme intellectual technologies of analyzing and synthesis of the forecasting system are researched. In this case the authors analyzed the degradation of the virtual machines owing to their interference on a common physical infrastructure. The authors proposed the approaches of the formation the input of the mathematical description which based on the cluster-analysis of the performance and resource usage metrics of the virtual machines. Considered feature set for recognize a condition of performance degradation includes the amount of allocated to host virtual machines

from each resource consumption class, the amount of available CPU, RAM and disk space and network channel. The algorithms are based on adaptive binary coding of feature vectors and optimization of geometrical parameters of feature space partition into classes equivalence to maximize the information ability of system intended to predict functional state of the computing environment. The modified information criterion for estimate efficiency of machine learning is expressed in terms of false omission rate and positive predictive value. The physical modeling of proposed algorithms are implemented by the example of cloud services from Google.

**Keywords:** virtual machine, cloud computing, machine learning, set of classes, feature set, container of class, information criterion, prediction, optimization.

## Интеллектуальная система прогнозирования снижения продуктивности виртуальных машин в среде облачных вычислений

В. В. Москаленко<sup>1)</sup>, С. В. Пимоненко<sup>2)</sup>

<sup>1), 2)</sup> Сумский государственный университет, ул. Римского-Корсакова, 2, г. Сумы, Украина, 40007

В статье в рамках информационно-экстремальной интеллектуальной технологии рассматривается анализ и синтез системы прогнозирования снижения производительности виртуальных машин на совместной физической инфраструктуре в результате их конкуренции за ресурсы. Предложено формирование входного математического описания системы путем кластер-анализа метрик производительности виртуальных машин и метрик использования ресурсов. В качестве признаков распознавания состояния снижения производительности системы рассматриваются количество размещенных на хосте виртуальных машин каждого класса потребления ресурсов и объем свободных ресурсов процессора, оперативной и дисковой памяти и сетевого канала.

Разработанные алгоритмы основываются на адаптивном двоичном кодировании признаков распознавания и оптимизации геометрических параметров разбиения пространства признаков на классы эквивалентности в процессе максимизации информационной способности системы оценки функционального состояния вычислительной среды. В качестве критерия оптимизации предложено использовать модификацию информационной меры Кульбака, что является функционалом от ошибки второго рода и первой достоверности принятия решений.

**Ключевые слова:** виртуальная машина, облачные вычисления, машинное обучение, класс распознавания, словарь признаков, информационный критерий, прогнозирование, оптимизация.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Amannejad A. Detecting Performance Interference in Cloud-Based Web Services / Y. Amannejad, D. Krishnamurthy, B. Far // International Symposium on Integrated Network Management. – 2015. – Ottawa, ON : IEEE Press. – P. 423 – 431.
2. Dupont C. An Energy Aware Framework for Virtual Machine Placement in Cloud Federated Data Centres / C. Dupont, G. Giuliani, F. Hermenier // Proceedings of the 3rd International Conference on Future Energy Systems: Where Energy, Computing and Communication Meet. – 2012. – No. 4. – New York, NY, USA : ACM. – 10 p.
3. CloudScale: Elastic Resource Scaling for Multi-Tenant Cloud Systems / Z. Shen, S. Subbiah, X. Gu // Symposium on Cloud Computing. – 2011. – New York, NY, USA : ACM. – 14 p.
4. Yang Z. Understanding the Effects of Hypervisor I/O Scheduling for Virtual Machine Performance Interference / Z. Yang, H. Fang, Y. Wu, C. Li, B. Zhao, H.H. Huang // 4th International Conference on Cloud Computing Technology and Science. – 2012. – IEEE Press. – P. 34 - 41.
5. Moskalenko V. V. Information-Extreme Algorithm for Optimizing Para-meters of Hyperellipsoidal Containers of Recognition Classes / A. S. Dovbysh, N. N. Budnyk, V. V. Moskalenko // Journal of automation and information sciences. – New York : Begell House Inc. – 2012. – V.44, I.10. – P. 35 - 44.
6. Dovbish A. S. Information-extreme algorithm for estimation of telecommunication GRID-system nodes / A. S. Dovbish, V. V. Moskalenko // Microwave and Telecommunication Technology (CriMiCo), 22nd International Crimean Conference. – 2012. – IEEE Press. – P.415 - 416.
7. Anderson B. J. Adapting K-Medians to Generate Normalized Cluster Centers / J. B. Anderson, D. S. Gross, D. R. Musicant, A. M. Ritz, T. G. Smith, L. E. Steinberg // Proceedings of the Sixth SIAM International Conference on Data Mining. – 2006. – Philadelphia : University City Science Center. – Pp. 165 - 175.
8. Liu Z. Characterizing Machines and Workloads on a Google Cluster / Z. Liu, S. Cho // 41st International Conference on Parallel Processing Workshops (ICPPW). – 2012. – IEEE Press. – P. 397 – 403.

## REFERENCES

1. Amannejad A., Amannejad Y., Krishnamurthy D., et al. (2015). Detecting Performance Interference in Cloud-Based Web Services. 2015 IFIP/IEEE International Symposium on Integrated Network Management (IM). (pp. 423 – 431).
2. Dupont C., Giuliani G., Hermenier F. (2012). An Energy Aware Framework for Virtual Machine Placement in Cloud Federated Data Centres. Proceedings of the 3rd

International Conference on Future Energy Systems: Where Energy, Computing and Communication Meet. (p. 10).

3. Shen Z., Subbiah S., Gu X. (2011). CloudScale: Elastic Resource Scaling for Multi-Tenant Cloud Systems. Proceedings of the 2nd ACM Symposium on Cloud Computing. (p. 14)

4. Yang Z., Fang H., Wu Y., et al. (2012). Understanding the Effects of Hypervisor I/O Scheduling for Virtual Machine Performance Interference. Proceedings of 4th International Conference on Cloud Computing Technology and Science. (pp. 34 - 41).

5. Moskalenko V.V., Dovbysh A.S., & Budnyk N.N., (2012). Information-Extreme Algorithm for Optimizing Parameters of Hyperellipsoidal Containers of Recognition Classes. Journal of automation and information sciences, 44, 35 - 44.

6. Dovbish A.S., Moskalenko V.V. (2012). Information-extreme algorithm for estimation of telecommunication GRID-system nodes. Proceedings of 22nd International Crimean Conference: Microwave and Telecommunication Technology (CriMiCo). (pp. 415 - 416).

7. Anderson J.B., Gross D.S., Musicant D.R., et al. (2006). Steinberg Adapting K-Medians to Generate Normalized Cluster Centers. Proceedings of the Sixth SIAM International Conference on Data Mining. (pp. 165 - 175).

8. Liu Z., Cho S. (2012). Characterizing Machines and Workloads on a Google Cluster. 41st International Conference on Parallel Processing Workshops (ICPPW). (pp. 397 – 403).

## УГОДА ПРО ПЕРЕДАЧУ АВТОРСЬКИХ ПРАВ

Ми, автор (автори) рукопису статті, що публікується в «Журналі інженерних наук», у разі її прийняття до опублікування передаємо засновникам та редколегії «Журналу інженерних наук» права на:

- публікацію цієї статті українською (російською, англійською) мовою та розповсюдження її друкованої версії;
- переклад статті англійською мовою (для статей українською або російською мовою) та розповсюдження друкованої версії перекладу;
- розповсюдження електронної версії статті, а також електронної версії англійського перекладу статті (для статей українською або російською мовою) через **будь-які** електронні засоби (розміщення на офіційному web-сайті журналу, в електронних базах даних, репозитаріях тощо).

При цьому зберігаємо за собою право **без узгодження** з редколегією та засновниками:

- використовувати матеріали статті повністю або частково з освітньою метою;
- використовувати матеріали статті повністю або частково для написання власних дисертацій;
- використовувати матеріали статті для підготовки тез, доповідей конференцій, а також усних презентацій;
- розміщувати електронні копії статті (у тому числі кінцеву електронну версію, завантажену з офіційного web-сайта журналу) на:
  - a) **персональних** web-ресурсах усіх авторів (web-сайти, web-сторінки, блоги тощо);
  - b) web-ресурсах установ, де працюють автори (включно з електронними інституційними репозитаріями);
  - c) **некомерційних** web-ресурсах відкритого доступу (наприклад, arXiv.org).

В усіх випадках наявність бібліографічного посилання на статтю або гіперпосилання на її електронну копію на офіційному web-сайті журналу є **обов'язковою**.

Цією угодою ми також засвідчуємо, що поданий рукопис:

- не порушує авторських прав інших осіб або організацій;
- не був опублікований раніше в інших видавництвах і не був поданий до публікації в інші видання.

**Адреса редакційної колегії:** вул. Римського-Корсакова, 2, м. Суми, 40007  
**Телефони:** (+38 0542) 68-78-52, (+38 0542) 33-41-09  
**Електронна адреса:** jes.sumdu@gmail.com  
**Web-site:** <http://jes.sumdu.edu.ua/>

Свідоцтво про Державну  
реєстрацію друкованого засобу масової інформації  
КВ № 20499-10299 ПР від 11.12.2013



Міністерство освіти і науки України

The Ministry of Education and Science of Ukraine

Министерство образования и науки Украины

**ЖУРНАЛ ІНЖЕНЕРНИХ НАУК**

**JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES**

**ЖУРНАЛ ИНЖЕНЕРНЫХ НАУК**

Науковий журнал

Scientific Journal

Научный журнал

**Відповідальний за випуск**

Д. В. Криворучко

**Комп'ютерне складання та верстання:**

О. В. Крухмаль

**Коректори:**

Н. А. Гавриленко, Н. З. Ключко, Н. В. Лисогуб, С. М. Симоненко

---

Підписано до друку 29.12.2015. Формат 60 x 84 / 8.

Папір офс. Друк офс.

Ум. друк. арк. 5,6. Обл.-вид. арк. 5,21.

Наклад 100 пр. Замовлення № 1046.

Сумський державний університет. 40007, м., Суми, вул. Римського-Корсакова, 2

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до Державного реєстру

ДК № 3062 від 17.12.2007.

Надруковано у друкарні СумДУ

вул. Римського-Корсакова, 2, м. Суми, 40007