

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І
НАУКИ УКРАЇНИ**

**Державний вищий
навчальний заклад
«ПРИАЗОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ
ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»
(ДВНЗ «ПДТУ»)**

ISSN 2225-6733

***ВІСНИК
ПРИАЗОВСЬКОГО
ДЕРЖАВНОГО
ТЕХНІЧНОГО
УНІВЕРСИТЕТУ***

ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ

**Видається 2 рази на рік
з 1995 року**

Випуск 42

Серія: Технічні науки

Маріуполь, 2021

**DEPARTMENT OF EDUCATION
SCIENCE OF UKRAINE**

**State higher
education institution
«PRYAZOVSKYI STATE
TECHNICAL UNIVERSITY»
(SHEI «PSTU»)**

ISSN 2225-6733

***REPORTER
OF THE PRYAZOVSKYI
STATE
TECHNICAL
UNIVERSITY***

**COLLECTION OF SCIENTIFIC
WORKS**

**Published twice a year,
since 1995**

Issue 42

Section: Technical sciences

Mariupol, 2021

Вісник Приазовського державного технічного університету: зб. наук. праць. Вип. 42. – Маріуполь: ДВНЗ «Приазов. держ. техн. ун-т», 2021. – 204 с. – (Технічні науки). – Режим доступу: DOI: 10.31498/2225-6733.42.2021.

У збірнику публікуються результати теоретичних та експериментальних досліджень вчених вищого навчального закладу та провідних спеціалістів у галузі технічних наук, показаний їхній вклад у розвиток науки та сучасних технологій.

Публікації видання зберігаються на офіційному сайті Національної бібліотеки України імені В.І. Вернадського.

Головний редактор

Чигарьов Валерій Васильович д-р техн. наук, професор, ДВНЗ «ПДТУ»

Заст. головного редактора

Матвієнко Володимир Миколайович д-р техн. наук, професор, ДВНЗ «ПДТУ»

Відповідальний секретар

Савенко Ольга Сергіївна

Редакційна колегія

Angeliki G. Lekatou Dr., PhD, University of Ioannina (UOI), Greece

Hossam Ahmed Mohamed Halfa Dr., PhD, Central Metallurgical R&D Institute (CMRDI), Cairo, Egypt

Sergey Edward Lyshevski Dr., PhD, Rochester Institute of Technology, New York, USA

Белоконь Каріна Володимирівна канд. техн. наук, доцент, Запорізька державна інженерна академія

Білоусов Євген Вікторович канд. техн. наук, доцент, Херсонська державна морська академія

Бурлака Володимир Володимирович д-р техн. наук, доцент, ДВНЗ «ПДТУ»

Бялобржеський Олексій Володимирович канд. техн. наук, доцент, КрНУ імені Михайла Остроградського

Володарець Микита Віталійович канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «ПДТУ»

Грицуц Ігор Валерійович д-р техн. наук, професор, Херсонська державна морська академія

Губинський Михайло Володимирович д-р техн. наук, професор, Національна металургійна академія України

Гулаков Сергій Володимирович д-р техн. наук, професор, ДВНЗ «ПДТУ»

Єфременко Василь Георгійович д-р техн. наук, професор, ДВНЗ «ПДТУ»

Жежеленко Ігор Володимирович акад., д-р техн. наук, професор, ДВНЗ «ПДТУ»

Ковалевська Олена Сергіївна канд. техн. наук, доцент, Донбаська державна машинобудівна академія

Кухар Володимир Валентинович д-р техн. наук, професор, ДВНЗ «ПДТУ»

Лук'яненко Анна Олегівна канд. техн. наук, Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона Національної академії наук України

Мазур Владислав Олександрович канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «ПДТУ»

Мамедов Аріф Тапдиг огли д-р техн. наук, професор, Азербайджанський технічний університет

Молчанова Віра Сергіївна канд. техн. наук, ст. викладач, ДВНЗ «ПДТУ»

Парфененко Юлія Вікторівна канд. техн. наук, доцент, Сумський державний університет

Петренко Тетяна Григорівна канд. техн. наук, доцент, Український державний університет

Плахтій Олександр Андрійович залізничного транспорту

Поднебенна Світлана Костянтинівна канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «ПДТУ»

Сагіров Юрій Георгійович канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «ПДТУ»

Саєнко Юрій Леонідович д-р техн. наук, професор, ДВНЗ «ПДТУ»

Сорочан Олена Миколаївна канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «ПДТУ»

Ткачов Віктор Васильович д-р техн. наук, професор, НТУ «Дніпровська політехніка»

Чейлях Олександр Петрович д-р техн. наук, професор, ДВНЗ «ПДТУ»

Коректори

Корчагіна Тетяна В'ячеславівна; Міхно Наталя Анатоліївна

Адреса редакції збірника: ДВНЗ «ПДТУ», к. 175, вул. Університетська, 7, м. Маріуполь, Донецька обл., 87555, Україна.

Address: PSTU, vul. Universytetska, 7, Mariupol, Donetsk Oblast, 87555, Ukraine.

Tel.: (0629) 44-62-34, tel/fax (0629) 33-34-16; fax: (0629) 52-99-24.

E-mail: vestnik.pgту@gmail.com (для надсилання статей).

Зареєстрований Міністерством Юстиції України 21.06.2011 р., Свідоцтво КВ № 17950 – 6800 ПР. Збірник входить до переліку наукових фахових видань (категорія «Б»), в якому можуть публікуватися основні результати дисертаційних робіт, згідно з Наказами Міністерства освіти і науки України № 409 від 17.03.2020, № 886 від 02.07.2020. Видається два рази на рік.

Рекомендовано до друку Вченою Радою ДВНЗ «ПДТУ», протокол № 13 від 27.05.2021 р.

ISSN 2225-6733 (Print), ISSN 2519-271X (Online)

ЗМІСТ

CONTENTS

**КОМП'ЮТЕРНІ НАУКИ ТА
ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ**

**COMPUTER SCIENCE AND
INFORMATION TECHNOLOGY**

**Бичко Д.В., Шендрюк В.В.,
Парфененко Ю.В.**

Розробка програмного додатку для роботи зі слабкоструктурованими даними медичних протоколів

7

**D.V. Bychko, V.V. Shendryk,
Yu.V. Parfenenko**

Development of a software application for work with poorly structured data of medical protocols

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

MATERIALS SCIENCE

**Білоник І.М., Капустян О.Є.,
Білоник Д.І., Шумикін С.О.,
Шумілов О.А., Губарь Є.Я.**

Виготовлення електрошлаковим наплавленням ударної частини молотків механізму струшування електрофільтрів

14

**I.M. Bilonik, O.Ye. Kapustian,
D.I. Bilonik, S.O. Shumikin,
O.A. Shumylov, Ye.Ya. Hubar**

Manufacture by electroslag surfacing of the impact part of the hammer of the mechanism for shaking electrical precipitators

Гаєрилова В.Г.

Матеріалознавча експертиза як елемент загальної оцінки стану транспортних засобів

21

V.G. Gavrylova

Material science expertise as an element of the overall assessment of the condition of vehicles

Кусса Р.О.

Вплив Q&P-обробки на мікроструктуру та механічні властивості низьковуглецевої TRIP-assisted сталі

28

R.O. Kussa

Effect of Q&P treatment on microstructure and mechanical properties of low-carbon TRIP-assisted steel

ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

SECTORIAL ENGINEERING

Бурлаков В.І.

Модельовання інструмента при вібро-магнітно-абразивному обробленні і вплив його на якість обробки надтвердої кераміки

37

V.I. Burlakov

Modelling of the tool at vibro-magnetic-abrasive processing and its influence on the quality of processing of super hard ceramics

МЕТАЛУРГІЯ

METALLURGY

**Кривенко В.В., Лялюк В.П.,
Чупринов Є.В., Трус І.М.,
Овчарук А.М.**

Оцінка металургійної цінності марганцевої сировини

43

**V.V. Krivenko, V.P. Lyalyuk,
E.V. Chuprinov, I.M. Trus,
A.M. Ovcharuk**

Evaluation of metallurgical value of manganese raw materials

**Маслов В.О., Пустовалов Ю.П.,
Трофімова Л.О., Дан Л.О.**

Особливості інтеркаляції металургійного графіту

50

**V.O. Maslov, Y.P. Pustovalov,
L.O. Trofimova, L.O. Dan**

Features of metallurgical graphite intercalating

**Чупринов Є.В., Лялюк В.П.,
Журавльов Ф.М., Швед С.В.,
Василенко І.А.**

Аеродинамічне розділення залізородних окатишів по крупності

**E.V. Chuprinov, V.P. Lyalyuk,
F.M. Zhuravlev, S.V. Shved,
57 I.A. Vasylenko**

Aerodynamic separation of iron ore pellets by size

**Аніщенко О.С., Гущин А.В.,
Кухар В.В., Присяжний А.Г.**

Врахування пружинення при художньо-му куванні волютоподібних елементів

**66 O.S. Anishchenko, A.V. Hushchyn,
V.V. Kukhar, A.G. Prysiazhnyi**

Taking into account springing in art forging of volute products

Ткаченко І.Ф., Мірошніченко В.І.

Прогнозування енергетичного стану нерівноважних термодинамічних систем в умовах деградації їхньої внутрішньої будови та функціональних властивостей

74 I.F. Tkachenko, V.I. Miroshnichenko

Prediction of an energy state for nonequilibrium thermodynamic systems under service conditions of their structure and performance degradation

Макуров С.А., Позібаєв О.Є.

Експериментальне дослідження електропровідності шлаків, що застосовуються у процесах спеціальної електрометалургії (СЕМ)

81 S.L. Makurov, O.E. Pogibayev

Experimental study of electrical conductivity of slags used in special electrometallurgy (SEM)

**Большаков Л.А., Дан Л.О.,
Трофімова Л.О.**

Дослідження властивостей формувальних сумішей, що містять лігносульфонати та поліетіленполіамін

**87 L.A. Bolshakov, L.O. Dan,
L.O. Trofimova**

The study of the properties of moulding sands containing lignosulfonates and polyethylenepolyamine

**Марков О.Є., Панов В.В.,
Іванова Ю.О., Хващинський А.С.,
Мусорін А.В., Косілов М.С.**

Експериментальне дослідження процесу розкочування ступінчастих конусних кілець

**92 O.E. Markov, V.V. Panov, Y.O. Ivanova,
A.S. Khvashchynskiy, A.V. Musorin,
M.S. Kosilov**

Experimental study of rolling processes of stepped conical rings

Kerimova G.Kh.

Optimization of technological processes of mineral waste processing Dashkesen ores

100 G.Kh. Kerimova

Optimization of technological processes of mineral waste processing Dashkesen ores

Rustamova S.M., Mamedov A.T.

Application of equations of the plasticity theory in the processes of processing porous body pressure

106 S.M. Rustamova, A.T. Mamedov

Application of equations of the plasticity theory in the processes of processing porous body pressure

**ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА,
ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА
ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА**

**ELECTRICAL ENGINEERING AND
ELECTROMECHANICS**

Лисяк В.Г., Олійник М.Й.

Моделювання динамічних режимів роботи асинхронного електроприводу з відцентровим насосним навантаженням

113 V.H. Lysiak, M.Y. Oliinyk

Simulation of dynamic operating modes of asynchronous electric drive with centrifugal pump load

**Прус В.В., Дегтяренко О.О.,
Вакуленко Р.А., Дзюбан В.С.**

Використання складових миттєвої потужності при локальному тестуванні шихтованих осердь статорів синхронних двигунів індукційним методом

122

**V.V. Prus, O.O. Dehtiarenko,
R.A. Vakulenko, V.S. Dziuban**

The use of instantaneous power components in local testing of laminated cores of synchronous motor stators by induction method

**ТЕХНОЛОГІЯ ЗАХИСТУ
НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА**

**ENVIRONMENTAL PROTECTION
TECHNOLOGY**

Іващенко В.Ю., Кухар В.В.

Подовження утилізаційного ресурсу штампів для горизонтально-кувальних машин

130

V.Yu. Ivashchenko, V.V. Kukhar

Utilization resource extension for the dies of horizontal forging machine

Кухар В.В.

Оцінка пилоутворення на відкритих терміналах морських портів при перевантаженні та зберіганні вугілля

139

V.V. Kukhar

Assessment of dust formation at the open seaport terminals during coal handling and storage

ЦИВІЛЬНА БЕЗПЕКА

CIVIL SECURITY

**Савельєв Д.В., Столбченко О.В.,
Юрченко А.А., Грунтовой Д.Р.**

Зниження утворення пилу при вибухових роботах в підземних гірничих виробках

149

**D.V. Saveliev, O.V. Stolbchenko,
A.A. Yurchenko, D.R. Hruntovoi**

Reduction of dust formation at blasting works in underground mining products

Когтєва О.П.

Лабораторна перевірка способу контролю дегазації гірничого масиву

157

O.P. Kohtieva

Laboratory verification of the method of rock degassing control

АВІАЦІЙНИЙ ТРАНСПОРТ

AIR TRANSPORT

Лавриненко О.С.

Вдосконалення методу моделювання потоку повітряних суден за рахунок імплементації моделі генерації його випадкових елементів

165

O.S. Lavrynenko

Improvement of the aircraft flow modelling method by the implementation of a model for generating its random elements

ЗАЛІЗНИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

RAILWAY TRANSPORT

**Панченко С.В., Фомін О.В.,
Ватуля Г.Л., Ловська А.О.,
Павлюченков М.В., Рибін А.В.**

Обґрунтування впровадження sin-балок в несучу конструкцію напіввагона

174

**S.V. Panchenko, O.V. Fomin,
G.L. Vatulia, A.O. Lovska,
M.V. Pavliyuchenkov, A.V. Rybin**

The feasibility of installing sin-beams in the load-bearing structure of the open car

**Фалендиш А.П., Іванченко Д.А.,
Клецька О.В., Кірицева О.В.,
Барібін М.А., Джус В.С.**

Модель нормування витрат енергії на тягу електропоїздів

184

**A.P. Falendysh, D.A. Ivanchenko,
O.V. Kletska, O.V. Kiritseva,
M.A. Baribin, V.S. Dzhus**

Model of rationing of energy expenses on electric trains traction

АВТОМОБІЛЬНИЙ ТРАНСПОРТ

ROAD TRANSPORT

Burlakova H.Y., Bukina M.D.

Rationale of the «safety» indicator differentiation and its implementation into the DCRE system

197

H.Y. Burlakova, M.D. Bukina

Rationale of the «safety» indicator differentiation and its implementation into the DCRE system

ДО УВАГИ АВТОРІВ

204 INTO CONSIDERATION OF AUTHORS

**КОМП'ЮТЕРНІ НАУКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНІ
ТЕХНОЛОГІЇ**

УДК 004.421.6

doi: 10.31498/2225-6733.42.2021.240563

© Бичко Д.В.¹, Шендрик В.В.², Парфененко Ю.В.³**РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ДОДАТКУ ДЛЯ РОБОТИ ЗІ
СЛАБОСТРУКТУРОВАНИМИ ДАНИМИ МЕДИЧНИХ ПРОТОКОЛІВ**

У даній роботі розглядається реалізація пошуку слабоструктурованих даних медичних протоколів з використанням API, який був створений на базі програмного додатку. Запропоновано процес обробки слабоструктурованого медичного протоколу шляхом формування JSON-файлів, занесення їх до бази даних та представлення на веб-сторінці. Запити користувача оброблюються через розроблений API та відображаються у вигляді результату через створений інтерфейс програмного додатку. Запропоновано структуру зберігання даних медичних протоколів у реляційній базі даних, механізм їх занесення та оновлення бази шляхом виконання автоматизованого скрипту. На прикладі тестових даних представлено градацію параметрів, що отримані шляхом первинної обробки протоколу і чітко характеризують симптоми та дозволяють швидко визначити захворювання. Розроблено програмний інтерфейс, який реалізує автоматичний витяг даних з бази даних, застосовуючи PHP, та дозволяє взаємодіяти лікарю з системою шляхом розширення вже існуючої інформаційної системи – довідника медичних протоколів у pdf-форматі, та реалізовано пошук ймовірних хвороб на основі введених лікарем симптомів через API шляхом використання мови програмування PHP. Покроково описані етапи методу обробки вхідних симптомів та представлено у вигляді вихідного запиту з відображенням ілюстрованих прикладів роботи через інструмент тестування та розробки API – Postman. Запити відправляються до бази даних, результат виводиться у форматі JSON. Даний підхід дозволяє динамічно формувати запит та, в залежності від вхідних параметрів, оброблювати існуючі дані у базі даних. Як результат, розроблено програмний додаток, який за введеними симптомами виводить усі можливі хвороби, що мають відповідні симптоми.

Ключові слова: слабоструктуровані медичні дані, запит, JSON, база даних, API, програмний інтерфейс.

D.V. Bychko, V.V. Shendryk, Yu.V. Parfenenko. Development of a software application for work with poorly structured data of medical protocols. This paper considers the implementation of the search for poorly structured data of medical protocols using the API which was created on the basis of a software application. The processing of a poorly structured medical protocol by creating JSON files, entering them into a database and presenting them on a web page has been proposed. The user's requests are processed through the developed API and are displayed as the result through the created interface of the software application. The structure of data storage of medical protocols in a relational database, the mechanism of their entering and updating the database by executing an automated script

¹ аспірант, Сумський державний університет, м. Суми, ORCID: 0000-0002-6854-945X, d.bychko11@gmail.com

² канд. техн. наук, доцент, Сумський державний університет, м. Суми, ORCID: 0000-0001-8325-3115, v.shendryk@cs.sumdu.edu.ua

³ канд. техн. наук, доцент, Сумський державний університет, м. Суми, ORCID: 0000-0003-4377-5132, yuliya_p@cs.sumdu.edu.ua

has been proposed. The example of the test data presents the gradation of the parameters obtained by primary processing of the protocol; the parameters clearly characterizing the symptoms and making it possible to quickly identify the particular disease. A software interface that implements automatic retrieval of data from the database using PHP, and makes it possible for the doctor to interact with the system by expanding the existing information system- that is a directory of medical protocols in pdf-format- has been developed, and search for possible diseases based on symptoms entered by the doctor via API use of PHP programming language has been implemented. The steps of the treatment method of the input symptoms have been described step by step and are presented in the form of an output query with the display of illustrated examples of work through the testing and developing API – Postman tool. Queries are sent to the database, the result is displayed in JSON format. This approach makes it possible to dynamically generate a query, and depending on the input parameters, to process the existing data in the database. As a result, a software application has been developed that displays all possible diseases that have the corresponding symptoms based on the entered symptoms.

Keywords: *poorly structured medical data, query, JSON, database, API, software interface.*

Постановка проблеми. У медичній сфері для визначення діагнозу та узгодження лікування використовуються уніфіковані слабоструктуровані медичні протоколи, які, зазвичай, складаються з більш ніж 50 сторінок. Час від часу з розвитком знань стосовно діагностування та лікування тих чи інших хвороб (наприклад, COVID-19) протоколи модифікуються, і, як результат, для надання кваліфікованої медичної допомоги лікарю необхідно актуалізувати свої знання. Але через велику кількість протоколів, відсутність чіткої історії змін версій та збігу симптомів для різних хвороб процес прийняття медичних рішень ускладнюється, і виникає потреба у лікарів більше часу приділяти вивченню всіх протоколів, ніж лікуванню хворих. Тому, для підвищення достовірності встановленого діагнозу з'явилася необхідність у створенні інструменту для витягу даних, які стосуються симптомів хвороби, із затверджених медичних протоколів, зберігання їх у зручній формі та легкої взаємодії лікаря з медичними протоколами під час прийому пацієнтів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для збереження усіх даних медичних протоколів в єдиному цифровому форматі було розроблено електронний довідник [1], який зберігає уніфіковані медичні протоколи у pdf-файлах з можливістю пошуку та завантаження. Реалізовано обробку даних з файлів медичних протоколів за допомогою методу, описаного у роботах [2, 3]. Результати обробки скрипту заносяться у JSON-файл. У роботі [4] представлено порівняння двох типів алгоритмів для зберігання у базі даних JSON-файлів та швидкість їх обробки. Цей підхід може використовуватися для зберігання даних медичних протоколів, так як він дозволяє якісно працювати з ієрархією даних у рамках одного файлу. Підхід, представлений у роботі [5], дозволяє підвищити ефективність роботи у сервісно-орієнтованих системах при взаємодії з XML-документами. Через велику кількість документів розмір XML-документів буде більшим, ніж JSON, тому модифікацію даного підходу можна використати у даній роботі з JSON-файлами. Можливість працювати з великими об'ємами даних описано у роботі [6]. Представлено підхід до зберігання та інтеграції даних у різних базах даних. Представлені рішення концептуально можуть бути застосовані у даній роботі, але адаптовані для використання у безкоштовних версіях системи керування базами даних [7].

У результаті огляду останніх досліджень та публікацій встановлено, що необхідно провести модифікацію існуючих рішень з обробки слабоструктурованих даних з урахуванням специфіки предметної області.

Метою даної роботи є розробка програмного додатку для роботи зі слабоструктурованими медичними протоколами на основі запропонованої структури даних для зберігання у базі даних та отримання доступу до даних шляхом обробки вхідних запитів через користувальницький інтерфейс.

Виклад основного матеріалу. Метод обробки слабоструктурованого медичного протоколу (рис. 1) дає змогу структурувати хворобу з її симптомами у зручному вигляді шляхом ділення оброблених даних та представлення у вигляді окремих JSON-файлів, як описано у роботах [2, 3]. Результатом обробки кожного протоколу є: 1) назва хвороби; 2) міжнародний іде-

нтифікатор МКХ-10; 3) набір симптомів; 4) набір значень для симптомів із кількісними та якісними значеннями.

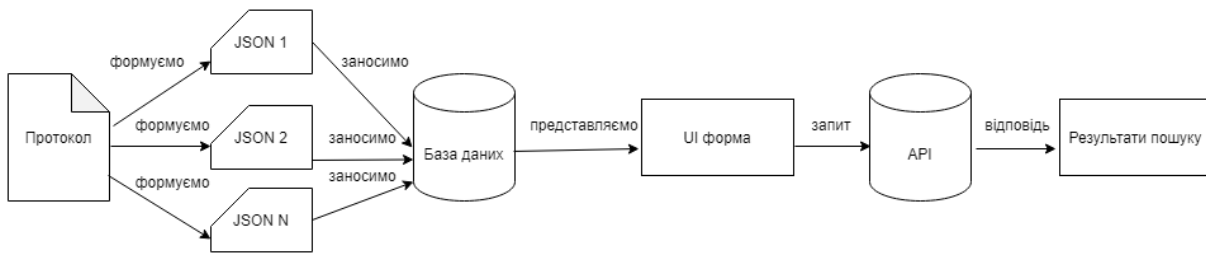


Рис. 1 – Етапи методу обробки слабоструктурованого медичного протоколу

Розглянемо як приклад отриманий JSON-файл з даними про симптоми однієї хвороби:

```
{
  "disease": [
    {
      "name": "грип",
      "icd10": "J10",
      "нежить": "відсутній",
      "кашель": "середній",
      "температура": "38.5-39.5"
    }
  ]
}
```

Унікальні параметри «name» та «icd10» отримані з неструктурованого медичного протоколу. Параметр «нежить» може приймати наступні можливі значення: «відсутній», «слабкий», «сильний». Параметр «кашель» має наступні можливі значення: «слабкий», «середній», «сильний». Параметр «температура» розділена на наступні можливі діапазони значень: «36.5-37.5», «37.5-38.5», «38.0-39.0», «38.5-39.5».

Одержані JSON-файли зберігаються у реляційній базі даних відповідно до представленої структури, зображеної на рис. 2. У разі необхідності присутня можливість додавання додаткових полів, а саме: параметру та його значення. Поле id створюємо з типом int та робимо його як Primary Key. Всі інші поля – з типом varchar.

disease
id(INT 11) - Primary Key
name(Varchar 256)
icd10(Varchar 256)
param1(Varchar 256)
value1(Varchar 256)
param2(Varchar 256)
value2(Varchar 256)
param3(Varchar 256)
value3(Varchar 256)

Рис. 2 – Структура даних

Занесення даних з кожного окремого JSON-файлу до бази даних відбувається шляхом автоматичного виконання скрипту, що розроблено на мові PHP. Результатом роботи скрипту є занесення даних до бази даних MySQL (рис. 3).

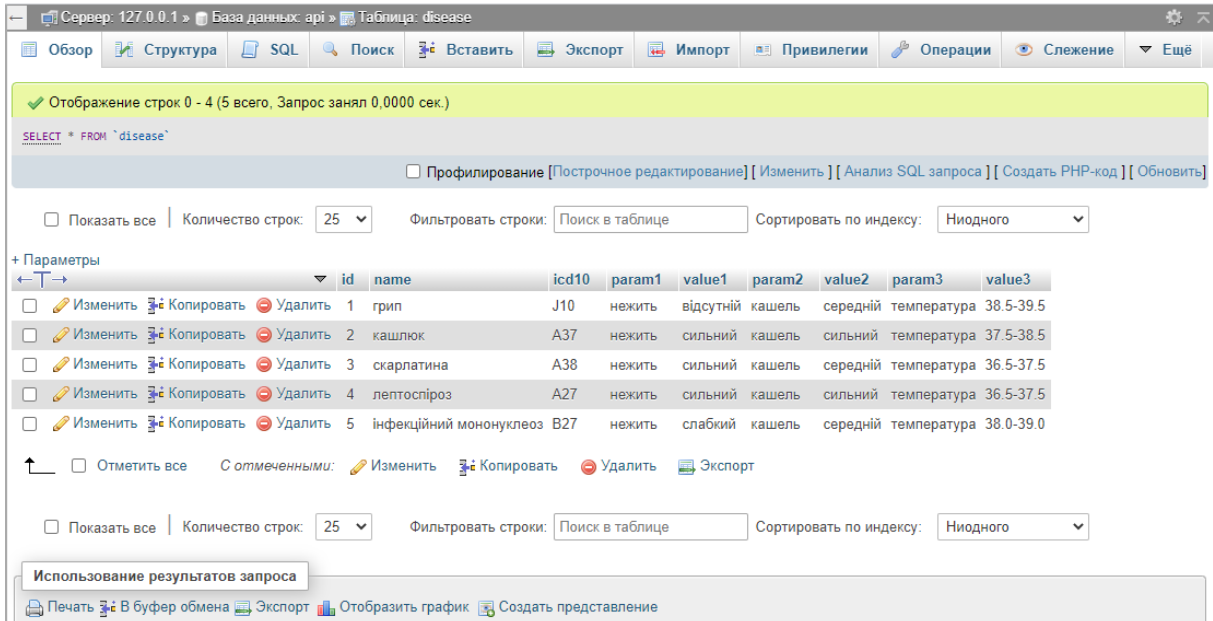


Рис. 3 – Результат заповнення даних з JSON-файлу

Для зручної взаємодії кінцевого користувача з даними медичних протоколів було вирішено інтегрувати раніше створений довідниковий ресурс [1], що складається зі слабоструктурованих медичних протоколів, які представлені у pdf-форматі, та програмний модуль пошуку хвороб за заданими симптомами, й розробити аналогічний дизайн пошукового модуля. Для розробки веб-інтерфейсу програмного додатку відносно макету використано HTML та CSS, а для динамічного додавання/видалення параметрів – JavaScript. Результат розробки представлений на рис. 4.

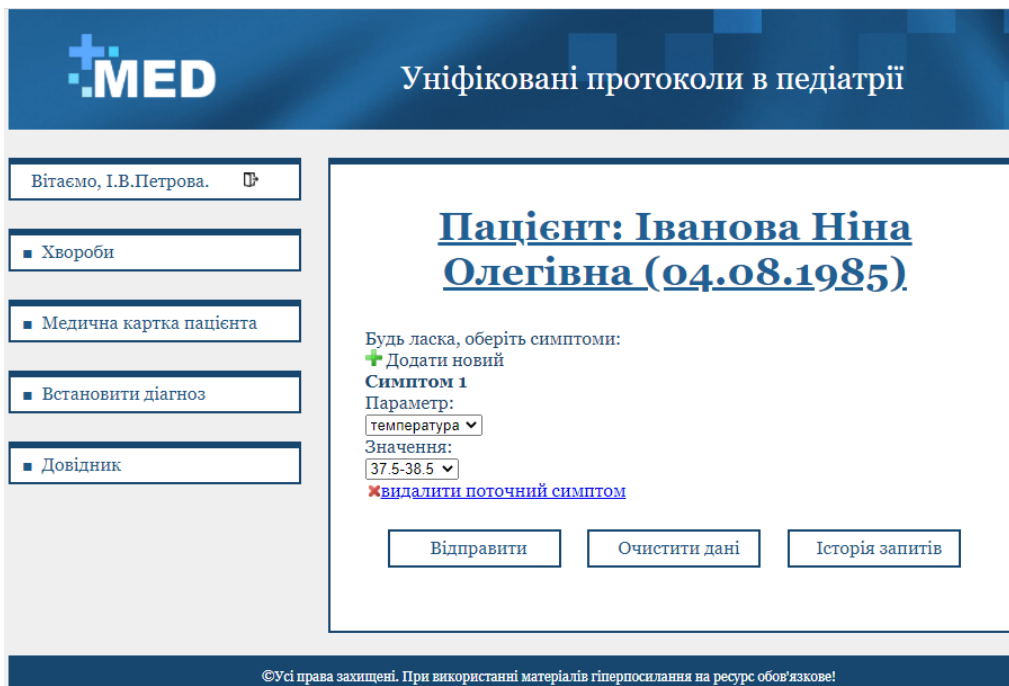


Рис. 4 – Відображення інтерфейсу

Веб-сторінка складається з 4 основних частин:

- Верхня частина сайту – містить назву ресурсу.
- Меню – знаходиться зліва і складається з 5 блоків:
 - форма з ім'ям та прізвищем лікаря, а також можливість вийти з облікового запису (використання даного ресурсу можливе лише при авторизації, тобто лише при наявності облікового запису лікар має доступ до ресурсу та даних власних пацієнтів);
 - хвороби – посилання на вже існуючий ресурс з медичними протоколами в педіатрії (можна ознайомитися за посиланням [1]);
 - медична картка пацієнта – з історією звернень до лікаря та можливістю відслідковування хронічних хвороб;
 - встановити діагноз – посилання на сторінку, в якій присутній фільтр для отримання даних про хворобу;
 - довідник – короткий довідник для лікаря з детальним описом роботи у системі.
- Контент – місце відображення даних про пацієнта, роботи з симптомами та їх значеннями через динамічне додавання/видалення параметрів, кнопок відправки запиту, очищення списку параметрів та історії запитів.
- Нижня частина сайту – місце, де розміщена інформація про приватність даних для копіювання.

Як видно з рисунку 4, користувач в рамках симптому обирає параметр та його значення, натискає на кнопку «Відправити» і повинен отримати результат у вигляді списку усіх можливих хвороб, які знайдені за заданими симптомами з відсотками збігу та посиланнями на протоколи лікування у довіднику. Для легкості підтримки програмного додатку було вирішено розробити власний API (application programming interface). Дане рішення дозволить відправляти запит напряму, а саме формувати запит у базу даних і передавати його Get-запитом та швидко отримувати необхідний результат.

Для розробки програмного додатку використана мова PHP та програма Postman, яка дозволяє швидко тестувати API. Файл зі скриптом складається з 4 основних функціональних частин, що дозволяють користувачу взаємодіяти з API:

- підключення заголовків для роботи з API;
- підключення до бази даних;
- методу обробки вхідних даних для формування рядку запиту до бази даних;
- функції обробки запитів.

Розглянемо більш детально кожен частину:

1. Для підключення заголовків використаємо представлені нижче рядки коду, які дозволять відправляти та обробляти дані під час запиту до API:

```
header('Access-Control-Allow-Origin: *');
header('Access-Control-Allow-Headers: *');
header('Access-Control-Allow-Methods: *');
header('Access-Control-Allow-Credentials: true');
header('Content-type: json/application');
```

2. Для підключення до бази даних використано PHP-метод `mysqli_connect(host, username, password, dbname, port, socket)`.

3. Метод обробки вхідних даних реалізовано у встановленій конфігурації файлу `.htaccess` та файлі `index.php`. Його мета – отриманий запит переробити у рядок для відправки коректного запиту до бази даних. Нехай вхідний запит має наступний вигляд: `http://localhost/test.com.ua/diseases¶m1=нежить&value1=сильний`. Етапи реалізації методу представлені нижче:

1) У файл `.htaccess` додамо правило `RewriteRule ^(.+)$ index.php?q=$1 [L,QSA]`, який дозволяє після `?` отримати параметр `q` зі значенням `= $1`.

2) У файлі `index.php` завдяки `$q=$_GET['q'];` отримуємо вхідні дані із запиту. За допомогою методу `explode('/', $q)` розбиваємо вхідний рядок на дві частини: до `«/»` та після нього. Усі наступні дії робимо для даних після `«/»`.

3) Через цикл перебираємо отримані дані та представляємо у вигляді `«$q .= $key.'='.$value.'&';»`. Результат обробки відображений на рис. 5.



Рис. 5 – Результат обробки даних у циклі для кроку 1

- 4) За допомогою методу `substr_replace()` видаляємо останній символ рядку, а саме «&».
 - 5) Методом `strstr()` видаляємо на початку рядку дані до першого входження «&».
 - 6) За допомогою методу `substr()` видаляємо перший символ вхідного рядку, а саме «&».
 - 7) Метод `str_replace()` дає змогу перетворити вхідні дані у вигляді запиту до бази даних.
- Результат представлений на рис. 6.

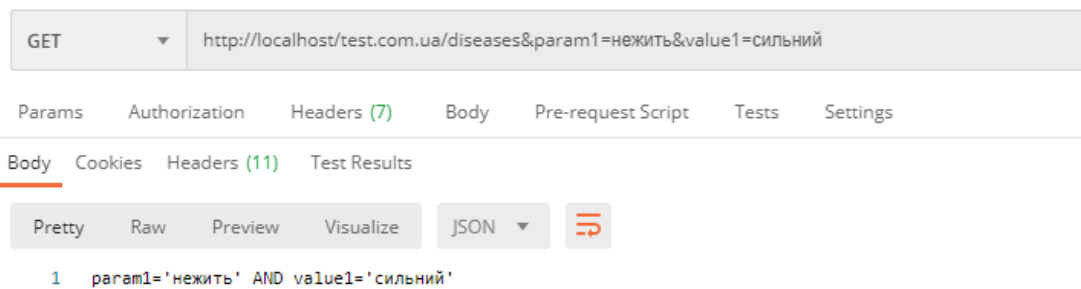


Рис. 6 – Результат роботи `str_replace()` методу

Отримані дані використовуються у пункті 4.

- 4) Розроблено дві функції обробки запитів: перша – виводить всі хвороби, у випадку відсутності вхідних параметрів ("SELECT * FROM `disease`"); друга – виводить результат обробки запиту (або інформацію, що нічого не знайдено, або всі поля отриманої хвороби/хвороб) – "SELECT * FROM `disease` WHERE \$id". На рис. 7 представлений приклад запиту з трьома параметрами, який повертає результат у вигляді JSON.

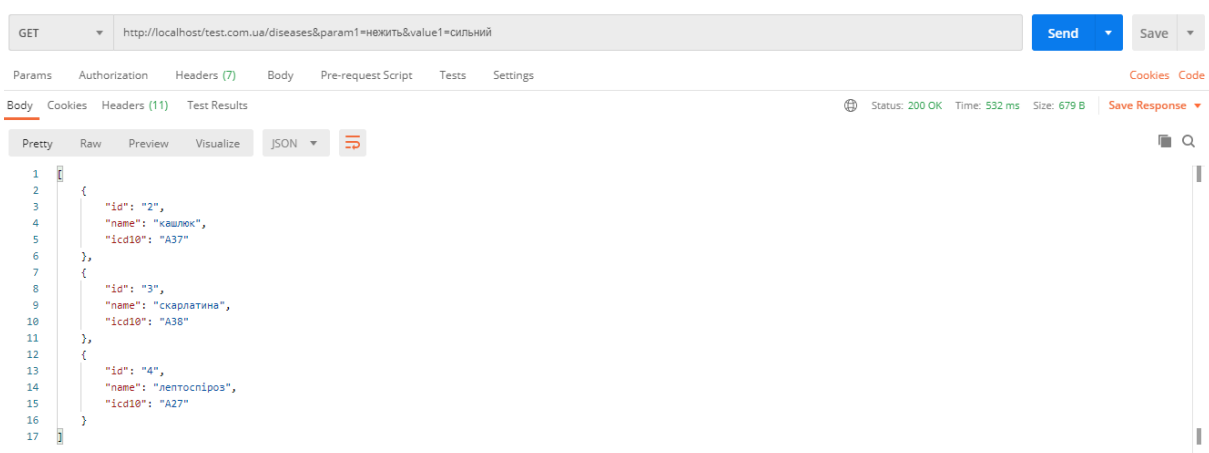


Рис. 7 – Результат роботи запиту до API з одним симптомом

Розроблений метод обробки вхідних даних та API-інтерфейс реалізовано у програмному додатку, який виконує автоматичний пошук усіх можливих хвороб за заданими симптомами. Як результат, лікар через зручний інтерфейс задає симптоми та очікує на виведення списку усіх можливих хвороб, які знайдені за заданими симптомами та отримані шляхом роботи API.

Висновки

У результаті роботи розроблено структуру зберігання даних медичних протоколів, які імпортовані з JSON файлу, у реляційній базі даних. Представлено метод обробки даних для формування запитів через API, який дозволяє швидко отримувати необхідні дані та представляти результати пошуку за заданими симптомами у вигляді списку можливих хвороб користувачу. Розроблено веб-інтерфейс програмного додатку, що реалізує запропонований метод. Створений програмний додаток у подальшому буде інтегровано як складову інформаційної системи підтримки прийняття медичних рішень.

Перелік використаних джерел:

1. Уніфіковані протоколи в педіатрії [Електронний ресурс] : [Веб-сайт]. – Електронні дані. – Режим доступу: <https://uniprotped.med.sumdu.edu.ua/>. – Назва з екрану.
2. Bychko D. Method of Primary Processing Unstructured Medical Data / D. Bychko, V. Shendryk, Y. Parfenenko // 2020 International Conference on e-Health and Bioengineering (EHB). – 2020. – Pp. 1-4. – Mode of access: <https://doi.org/10.1109/EHB50910.2020.9280175>.
3. Бичко Д. Метод первинної обробки слабоструктурованих медичних даних / Д. Бичко, В. Шендрік, Ю. Парфененко // Information systems and networks. – 2020. – Vol. 8. – С. 1-10. – Режим доступу: <https://doi.org/10.23939/sisn2020.08.001>.
4. Petkovic D. Shredding JSON Data into Relational Environment / D. Petkovic, A. Piriyaie // International Journal of Computer Applications. – February, 2021. – Vol. 174 (17). – Pp. 25-29. – Mode of access: <https://doi.org/10.5120/ijca2021921058>.
5. Tiwary G. Compression of XML and JSON API Responses / G. Tiwary, E. Stroulia, A. Srivastava // IEEE Access. – April, 2021. – Pp. 1-15. Mode of access: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3073041>.
6. Petkovic D. JSON Integration in Relational Database Systems / D. Petkovic // International Journal of Computer Applications. – June, 2017. – Vol. 168 (5). – Pp.14-19. – Mode of access: <https://doi.org/10.5120/ijca2017914389>.
7. Oracle Database 12c Standard Edition 2 [Електронний ресурс] : [Веб-сайт]. – Електронні дані. – Режим доступу: <https://softlist.com.ua/catalog/product-oracle-database-12c/>. – Назва з екрану.

References:

1. *Unifikovani protokoly v pediatrii* (Unified protocols in pediatrics) Available at: <https://uniprotped.med.sumdu.edu.ua/> (accessed 08 March 2021). (Ukr.)
2. D. Bychko, V. Shendryk, Y. Parfenenko. Method of Primary Processing Unstructured Medical Data. *2020 International Conference on e-Health and Bioengineering (EHB)*, 2020, pp. 1-4. **doi: 10.1109/EHB50910.2020.9280175**.
3. Bychko D., Shendryk V., Parfenenko Y. Metod pervinnoi obrobki slabostrukturovanikh medichnikh danikh [The method of primary processing of poorly structured medical data]. *Information systems and networks*, 2020, vol. 8, pp. 1-10. **doi: 10.23939/sisn2020.08.001**. (Ukr.)
4. Petkovic D., Piriyaie A. Shredding JSON Data into Relational Environment. *International Journal of Computer Applications*, February 2021, vol. 174 (17), pp. 25-29. **doi: 10.5120/ijca2021921058**.
5. Tiwary G., Stroulia E., Srivastava A. Compression of XML and JSON API Responses. *IEEE Access*, April 2021, pp. 1-15. **doi: 10.1109/ACCESS.2021.3073041**.
6. Petkovic D. JSON Integration in Relational Database Systems. *International Journal of Computer Applications*, June 2017, vol. 168 (5), pp.14-19. **doi: 10.5120/ijca2017914389**.
7. Oracle Database 12c Standard Edition 2 Available at: <https://softlist.com.ua/catalog/product-oracle-database-12c/> (accessed 08 March 2021). (Rus.)

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

УДК 669.187.56

doi: 10.31498/2225-6733.42.2021.240566

© Білоник І.М.¹, Капустян О.Є.², Білоник Д.І.³, Шумикін С.О.⁴,
Шумілов О.А.⁵, Губарь Є.Я.⁶**ВИГОТОВЛЕННЯ ЕЛЕКТРОШЛАКОВИМ НАПЛАВЛЕННЯМ УДАРНОЇ
ЧАСТИНИ МОЛОТКІВ МЕХАНІЗМУ СТРУШУВАННЯ
ЕЛЕКТРОФІЛЬТРІВ**

Показана доцільність та актуальність розробки технологічних рішень, що дозволяють підвищити ефективність роботи електричних осаджувальних фільтрів, які являються основним газоочисним устаткуванням на теплових електростанціях, підприємствах металургійної та цементної промисловості. Рекомендовано поліпшити роботу механізму струшування електрофільтру шляхом формування ударної частини молотка матеріалом стійким до пластичної деформації в умовах дії ударних навантажень та забезпечує мінімальну і незмінну площу ударного контакту молотка з ковадлом балки струшування протягом усього циклу експлуатації. Огляд і аналіз публікацій у сфері наплавлення дозволив виявити відсутність даних про властивості наплавленого електрошлаковим способом пропонованого матеріалу, а так само про його застосування в ударних механізмах електрофільтрів. Ударну частину молотка виготовили із запропонованого матеріалу шляхом електрошлакового наплавлення у спеціальному роз'ємному мідному водоохолоджуваному кристалізаторі порошковим електродом. Досліджено структуру та властивості металу зміцненої частини молотка. В результаті встановлено, що хімічний склад металу наплавленої ударної частини молотка близький до складу металу наплавленого електродами ОЗН-300М зі зниженим вмістом сірки і фосфору, що обумовлено ефектом рафінування при електрошлаковому переплаві; процес наплавлення забезпечує формування щільної монолітної, однорідної дисперсної й бездефектної структури, характерної для литого електрошлакового металу. У литому металі виявлено наявність неметалевих включень переважно глобулярної форми та характерним середнім розміром 2,5-4,5 мкм у вигляді оксидів і сульфідів з об'ємним відсотком $(0,60-0,70) \times 10^{-2}$ і $(0,51-0,60) \times 10^{-2}$ відповідно.

Ключові слова: електрошлакове наплавлення, порошковий електрод, структура, неметалеві включення, розмір.

I.M. Bilonik, O.Ye. Kapustian, D.I. Bilonik, S.O. Shumikin, O.A. Shumylov, Ye.Ya. Hubar. Manufacture by electroslag surfacing of the impact part of the hammer of the mechanism for shaking electrical precipitators. The expediency and relevance of the development of technological solutions that make it possible to increase the efficiency

¹ канд. техн. наук, доцент, Національний університет «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, ORCID: 0000-0002-3873-5307, bilonikelena@gmail.com

² канд. техн. наук, доцент, Національний університет «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, ORCID: 0000-0002-8979-8076, aek@zntu.edu.ua

³ аспірант, Національний університет «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, ORCID: 0000-0003-3274-0604, bilonikelena@gmail.com

⁴ канд. техн. наук, доцент, Національний університет «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, ORCID: 0000-0003-3407-2507, Shusa1958@ukr.net

⁵ завідувач лабораторією, Національний університет «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, aek@zntu.edu.ua

⁶ канд. техн. наук, професор, Черкаський державний технологічний університет, м. Черкаси, ORCID: 0000-0001-9266-1137, aek@zntu.edu.ua

of electric precipitation filters, which are the main gas cleaning equipment at thermal power plants, metallurgical and cement industries, have been considered. It is recommended to improve the operation of the shake mechanism of the electrical precipitator by forming the impact part of the hammer with a material resistant to plastic deformation under impact loads and provides a minimum and constant area of impact contact of the hammer with the shaking anvil beam throughout the life cycle. Review and analysis of publications in the field of surfacing revealed the lack of data on the properties of the proposed material deposited by electroslag method, as well as its use in the impact mechanisms of electrical precipitators. The impact part of the hammer was made of the proposed material by electroslag surfacing in a special detachable copper water-cooled mold with a powder electrode. The structure and properties of the metal of the hardened part of the hammer have been studied. As a result, it has been found that the chemical composition of the metal of the deposited impact part of the hammer is close to the composition of the metal deposited with the OZN-300M electrodes with a low content of sulfur and phosphorus; this being due to the effect of refining in electroslag remelting. The surfacing process provides the formation of a tight monolithic, homogeneous dispersed and defect-free structure characteristic of cast electroslag metal. In the cast metal, the presence of non-metallic inclusions of predominantly globular shape with a characteristic average size of 2.5-4.5 μm in the form of oxides and sulfides with a volume percentage $(0.60-0.70) \times 10^{-2}$ and $(0.51-0.60) \times 10^{-2}$, respectively has been revealed.

Keywords: *electroslag surfacing, powder electrode, structure, non-metallic inclusions, size.*

Постановка проблеми. Ефективність роботи електричних осаджувальних фільтрів вельми істотно залежить від ступеня очищення осаджувальних і коронуючих електродів від зібраного на них пилу. Цій проблемі присвячені численні наукові дослідження, технічні розробки, а також рекомендації та пропозиції, захищені авторськими свідоцтвами і патентами [1-7].

Більшість машин і механізмів при експлуатації схильні до зносу. Найбільш часто спостерігаються такі види зносу, як газо- та гідроабразивне, ударне, термічне, корозійне. В результаті, зношування змінюються форма і розміри деталей. Ці явища призводять до зниження техніко-економічних показників роботи, які призводять, як правило, до виходу з ладу або ж поломки.

Для нейтралізації впливів зносу необхідно чітко визначити вид зношування, матеріали, які найменшою мірою схильні до зношування в конкретних умовах експлуатації, а так само технологію нанесення зносостійких матеріалів. У даний час розроблена широка гама зносостійких матеріалів і технологій їх нанесення, які захищають від зносу деталі.

Дані розробки забезпечують продовження терміну експлуатації обладнання при незмінності його регламентних характеристик.

В осаджувальних електричних фільтрах одним з важливих вузлів є механізм формування ударних імпульсів, які обтрушують осаджувальні електроди. В результаті зношування ударних поверхонь, що контактують молоток-ковадло балки струшування, знижується ефективність очищення електродів і розвивається так званий вторинний унос пилу. Щоб виключити ці негативні явища доцільно застосувати зносостійке наплавлення контактуючих ударних поверхонь.

На сьогоднішній день електричні осаджувальні фільтри застосовують на багатьох підприємствах України, Америки, Китаю, країнах Європи. Тому, розробка технологічних рішень, що дозволяють підвищити ефективність роботи електрофільтру, є важливим і актуальним завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У попередньому доробку авторів [8] представлені дані про доцільність зміцнення молотків ударного механізму струшування осаджувальних і коронуючих електродів електрофільтрів електрошлаковим наплавленням (ЕШН). Огляд і аналіз публікацій у сфері газоочищення дозволив виявити сформовані тенденції до підвищення ефективності передачі ударного імпульсу механізмом струшування електрофільтру. Для цього визнано необхідним забезпечувати точковий контакт молоток-ковадло в ударних механізмах електрофільтру. Проведено аналіз матеріалів, які доцільно рекомендувати для виготовлення ударної частини молотка. Представлений аналіз показників твердості та хімічного складу зносостійких матеріалів, які працюють в умовах ударного впливу і володіють задовільною зварюваністю з низьковуглецевими сталями.

Слід зазначити, що при всьому різноманітті наявних конструкцій і технологічних варіантів струшування електродів в їх основі задіяна енергія ударного імпульсу.

Ударні імпульси генеруються в результаті механічного удару молотків молоткового вала по ковадлах балок струшування. Для конкретної конструкції електрофільтру параметри ударного імпульсу (енергія, прискорення, тривалість, повторюваність), як правило, визначаються конструктивно, виходячи з умови максимального ступеня очищення (струшування) електродів. В результаті експлуатації електрофільтру відбувається багаторазова ($500...600 \times 10^3$) ударна дія кожного молотка по ковадлу балки струшування. При цьому, як показано в роботі [8], початковий точковий контакт молотка з ковадлом зазнає значну пластичну деформацію і переходить в лінійний, а потім в площинний. Це призводить до погіршення енергетичних параметрів ударного імпульсу і відповідно до зниження ступеня очищення електродів електрофільтру. З огляду на вище сказане, буде доцільно виготовляти ударну частину молотка із зносостійкого матеріалу, що володіє підвищеним опором до пластичної деформації в умовах дії ударних навантажень.

В роботі [8] проведено аналіз сучасних матеріалів, що володіють підвищеною стійкістю до ударних навантажень і мають гарну зварюваність. Рекомендовано: ударну частину молотка виготовляти з матеріалу, який близький до складу металу наплавленого електродами ОЗН-300М, метод виготовлення – електрошлакове наплавлення (припавлення).

Однак дані про властивості наплавленого електрошлаковим способом пропонованого матеріалу наступного хімічного складу, %: 0,10 С; 3,00 Mn; 1,30 Si; 0,02 S; 0,03 P, практично відсутні.

Мета дослідження. Отримати дослідні зразки молотків з ударною частиною з матеріалу, близького до складу металу, наплавленого електродами ОЗН-300М. Дослідити хімічний склад, структуру та неметалеві включення у наплавленому металі.

Виклад основного матеріалу. ЕШН виконували на установці А-550 за схемою, представлена на рисунку 3 [8], порошковим електродом з параметрами, наведеними на рисунку 4 [8]. Для отримання необхідної форми ударної частини використовували спеціальний роз'ємний мідний водоохолоджуванний кристалізатор. Параметри наплавлення: струм 1300-1400 А; напруга – 39 В, флюс АНФ-6 [9, 10]. Наплавлені молотки не вимагали фінішної механічної обробки.

Металева оболонка коробчастого порошкового електроду виготовлена зі сталі 08кп товщиною 2 мм. Шихта представляла собою суміш FeMn ДСТУ 3547-97 і FeSi ДСТУ 4127:2002, а кількість феросплавів розрахована з урахуванням частки металевої складової.

З наплавлених деталей виготовили зразки для дослідження хімічного складу, макро- і мікроструктури, вмісту неметалічних включень, їх характерного розміру і морфології.

Хімічний склад металу наплавленої електрошлаковим способом ударної частини молотка (0,12% С, 2,95% Mn, 1,31% Si) відповідає рекомендованому в роботі [8]. Слід зазначити знижений вміст сірки і фосфору (0,010% S; 0,015% P) – в 2 рази порівняно з завданням, що обумовлено ефектом рафінування при використанні флюсу АНФ-6 [10].

Макро- і мікроструктура наплавленого металу ударної частини молотка представлені на рисунках 1 і 2 відповідно.

Метал ударної частини молотка, наплавлений у водоохолоджуваному мідному кристалізаторі, має характерну для електрошлакової відливки будову – спрямоване зростання кристалів, кут нахилу стовпчастих кристалів до осі відливки 40-45°. Макроструктура щільна, однорідна, дефекти усадочного, ліквацийного і технологічного характеру відсутні. Макроструктура зони сплаву ударної частини із хвостовиком так само характеризується монолітністю і відсутністю дефектів.

Мікроструктура ударної частини молотка (рис. 2) троостітосорбітна. Як видно, структура однорідна і дисперсна, що характерно для литого металу ЕШН.

Вміст неметалевих включень (об'ємну частку) у наплавленій ударній частині визначали згідно методик [11]. Встановлено, що у литому металі основними типами неметалевих включень були оксиди і сульфіді. Вміст неметалевих включень становить, об'ємний відсоток: оксиди $(0,60-0,70) \times 10^{-2}$, сульфіді $(0,51-0,60) \times 10^{-2}$.

Морфологію неметалевих включень досліджували згідно з методиками [12, 13]. Неметалеві включення в більшості випадків мали глобулярну форму (рис. 3) і представлені нестехіометричним окисом алюмінію і нестехіометричним окисом алюмінію з корольками металу. Глобулярна форма і дисперсність (2,5-4,0 мкм) неметалевих включень у металі наплавленої ударної

частини підвищує такий показник якості, як робота зародження тріщин. В умовах дії інтенсивних ударних навантажень, неметалеві включення глобулярної форми не ініціюють виникнення мікротріщин [14-16].

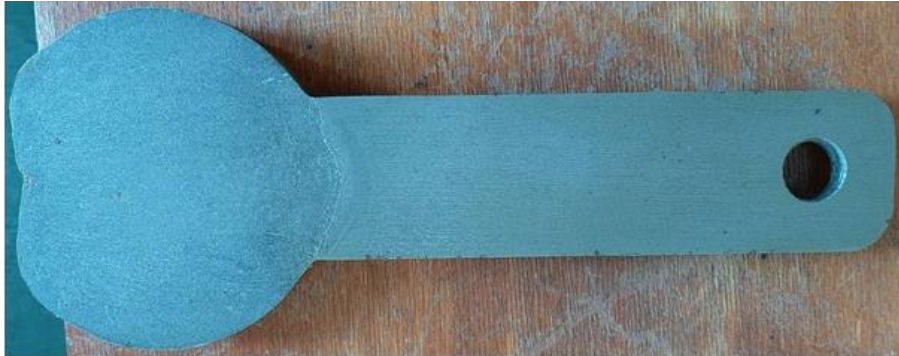


Рис. 1 – Макроструктура наплавленого металу молотка зі зміцненою ударною частиною, $\times 0,5$

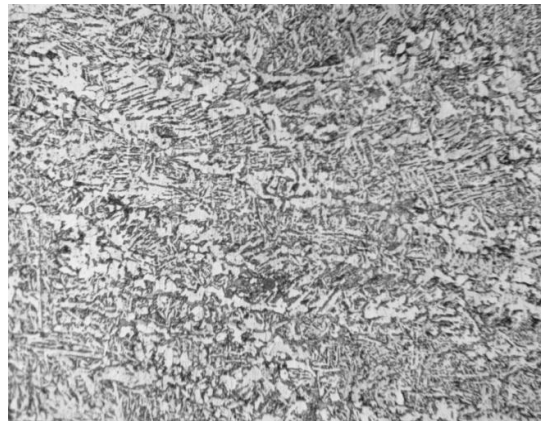


Рис. 2 – Мікроструктура наплавленого металу молотка зі зміцненою ударною частиною, $\times 350$

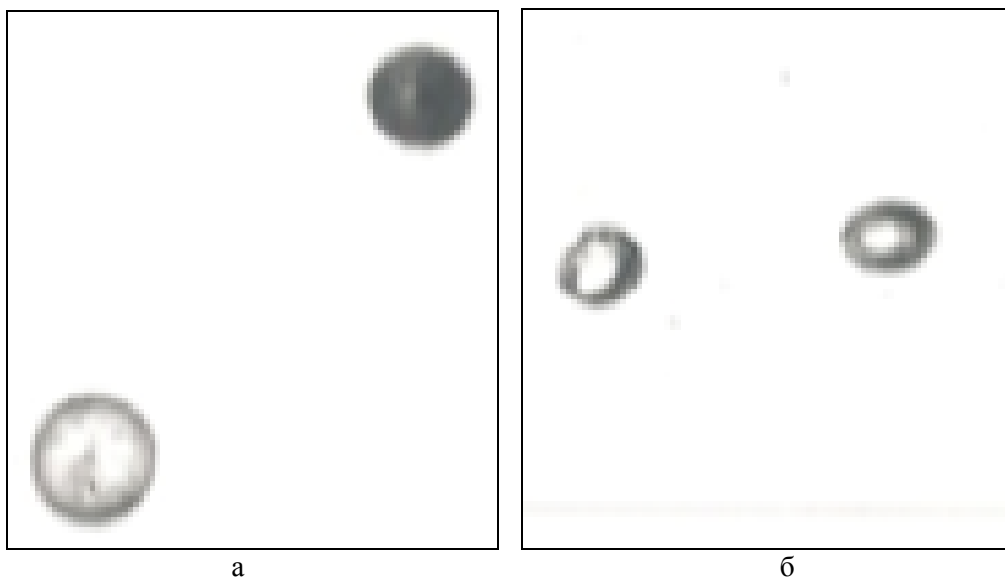


Рис. 3 – Мікроструктура неметалевих включень, $\times 150$: а – нестехіометричний окис алюмінію; б – нестехіометричний окис алюмінію з корольками металу

Найбільш характерний розмір як сульфідних, так і оксидних включень – 2,5-4,5 мкм. Тобто неметалеві включення набагато дисперсніші в порівнянні з включеннями в ливарних сплавах, одержуваних традиційними металургійними методами [17-19].

Розподіл неметалевих включень по розмірним групам наведено на рисунку 4.

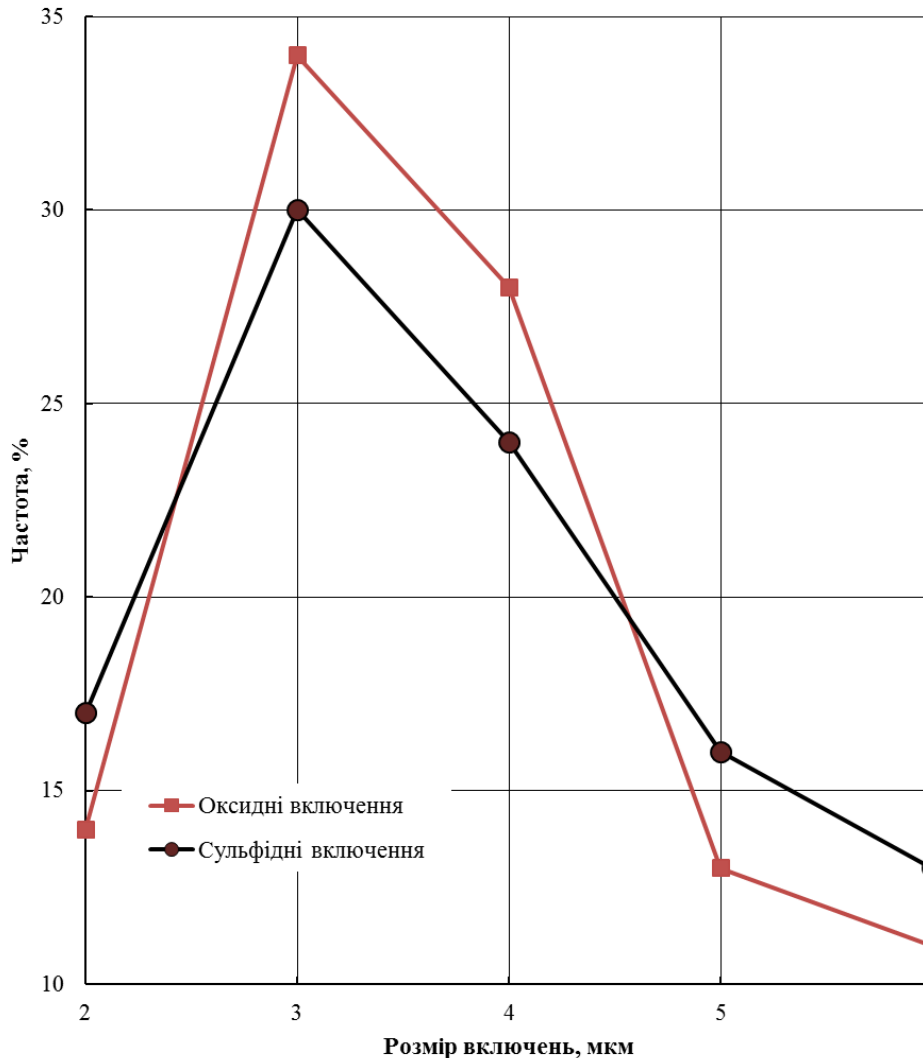


Рис. 4 – Частотний розподіл за розмірами неметалевих включень

На підставі отриманих результатів з метою підвищення якості молотків механізму струшування електрофільтрів доцільно рекомендувати виготовляти молотки біметалічними. Ударна частина – матеріал із хімічним складом, %: 0,10 C; 3,00 Mn; 1,30 Si; 0,02 S; 0,03 P. Хвостовик – Сталь 20.

Подальші роботи будуть спрямовані на вивчення механічних властивостей наплавленого металу, проведення порівняльних випробувань на знос при ударних навантаженнях дослідної партії молотків із зміцненою ударною частиною, аналіз стійкості ударної частини молотків та ефективності роботи електрофільтра (зниження енерговитрат в ударних механізмах); надання рекомендації для промислового застосування молотків із зміцненою ударною частиною.

Висновки

При дослідженні якості наплавленого електрошлаковим способом металу ударної частини молотків встановлено:

- макроструктура наплавленої частини і зони сплавлення з хвостовиком щільна, однорідна, дефекти ліквідаційного, усадочного і технологічного характеру відсутні;

- в результаті використання рафінуючого флюсу АНФ-6 в наплавленому металі знизився вміст неметалевих включень в 2 рази порівняно з завданням – сірки до 0,010%, фосфору до 0,015%;

- в наплавленому металі неметалеві включення мають глобулярну форму, а найбільш характерний розмір – 2,5...4,5 мкм, що має підвищувати опірність сталі пластичній деформації і практично виключати вірогідність виникнення втомних тріщин в ударній частині молотків при їх експлуатації.

Перелік використаних джерел:

1. Санаев Ю.И. Экспериментальное исследование уноса пыли в электрофильтрах и разработка методов его снижения : дис. канд. техн. наук : 05.17.08 / Санаев Юрий Иванович. – М., 1978. – 174 с.
2. Чекалов Л.В. Научные основы создания электрогазоочистного оборудования нового поколения : автореф. дис. ... докт. техн. наук : 05.14.12 / Чекалов Лев Валентинович. – М., 2007. – 40 с.
3. Акопян А.Г. Интенсификация работы мокрых электрофильтров для улавливания высокодисперсных частиц тумана : дис. ... канд. техн. наук : 03.00.16 / Акопян Акоп Георгиевич. – М., 2003. – 138 с.
4. Санаев Ю.И. Влияние изменения параметров пылегазовой среды по длине электрофильтра на степень очистки газов / Ю.И. Санаев // Химическое и нефтяное машиностроение. – 2006. – № 7. – С. 31-33.
5. РД 34.27.504-91. Типовая инструкция по эксплуатации электрофильтров. – Утв. 1991-05-06. – М., 1993. – 44 с.
6. Каталог пылеулавливающего оборудования / под ред. Л. В. Чекалова. – Ярославль : Кондор-Эко, 2006. – 240 с.
7. А.с. 584449 СССР, МПК В 03 С 3/08. Электрофильтр / В.В. Бордачева, А.И. Валувев, Ю.С. Миловидов, С.Н. Панев, В.М. Ткаченко. – № 2309807; заявл. 13.11.1975; опубл. 15.05.1979, Бюл. № 18. – 2 с.
8. Білоник І.М. Вибір матеріалу і способу зміцнення ударної частини молотків механізму струшування електрофільтрів / І.М. Білоник, М.М. Береговенко, Д.І. Білоник, О.Є. Капустян, А.Е. Смакограй, С.О. Шумикін // Вісник Приазовського державного технічного університету. – 2021. – Вип. 41. – С. 52-59. – (Серія: Технічні науки). – Режим доступу: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.41.2020.226182>.
9. Электрошлаковая наплавка / под ред. А. Ф. Пименова. – М. : Наука и техника, 2001. – 180 с.
10. Медовар Б.И. Электрошлаковая технология в машиностроении / Б.И. Медовар, В.Я. Саенко, И.Д. Нагаевский, А.Д. Чепурной. – К. : Техніка, 1984. – 215 с.
11. ASTM E1245-03. Standard practice for determining the inclusion or second-phase constituent content of metals by automatic image analysis. – 2016. – 8 p.
12. Григорович К.В. Анализ неметаллических включений – основа контроля качества стали и сплавов / К.В. Григорович, П.В. Красовский, А.С. Грушников // Аналитика и контроль. – 2002. – Т. 6. – № 2. – С. 133-135.
13. Литвинова Т.И. Петрография неметаллических включений / Т.И. Литвинова, В.П. Пирожкова, А.К. Петров. – М. : Металлургия, 1972. – 184 с.
14. Лунев В.В. Природа неметаллических включений и свойства стали / В.В. Лунев // Неметалічні вкраплення і гази у ливарних сплавах: тези доп. XII Міжнар. наук.-техн. конф. – Запоріжжє, 2012. – С. 118.
15. Электрошлаковый металл / под ред. Б.Е. Патона, Б.И. Медовара. – К. : Наукова думка, 1981. – 680 с.
16. Лунев В.В. Неметаллические включения в сталях, чугунах и ферросплавах / В.В. Лунев, В.И. Пирожкова, С.Г. Грищенко. – Запоріжжє : Днепропетровский металлург, 2006. – 384 с.
17. Губенко С.И. Неметаллические включения в стали / С.И. Губенко, В.В. Парусов, И.В. Дервянченко. – Днепропетровск : Арт-Пресс, 2005. – 160 с.
18. Ясюков В.В. Газы и неметаллические включения в стальных отливках / В.В. Ясюков, Т.В. Лысенко, Е.А. Пархоменко // Металл и литье Украины. – 2017. – № 11-12 (294-295). – С. 19-22.

19. Виноград М.И. Включения в легированных сталях и сплавах / М.И. Виноград, Г.П. Громова. – М. : Metallurgiya, 1971. – 216 с.

References:

1. Sanaev Yu.Y. *Ekspperimentalnoe issledovanie unosa pyli v elektrofiltrakh i razrabotka metodov ego snizheniia*. Diss. kand. techn. nauk [Experimental research of dust entrainment in electrostatic precipitators and the development of methods for its reduction. Cand. tech. sci. diss.]. Moscow, 1978. 174 p. (Rus.)
2. Chekalov L.V. *Nauchnye osnovy sozdaniia elektrogazoochistnogo oborudovaniia novogo pokoleniia*. Avtoref. diss. dokt. techn. nauk [Scientific basis for creating a new generation of electro-gas cleaning equipment. Thesis of doct. tech. sci. diss.]. Moscow, 2007. 40 p. (Rus.)
3. Akopian A.H. *Intensifikatsiia raboty mokrykh elektrofiltriv dlia ulavlivaniia vysokodispersnykh chastits*. Diss. kand. techn. nauk [Intensification of wet electrostatic precipitators operation for capturing highly dispersed particles. Cand. tech. sci. diss.]. Moscow, 2003. 138 p. (Rus.)
4. Sanaev Yu.Y. Vliianie izmeneniia parametrov pylegazovoi sredy po dline elektrofiltra na stepen ochistki gazov [Influence of changing the parameters of dust and gas environment along the length of electrostatic precipitator on degree of gas purification]. *Khimicheskoe i neftianoe mashinostroenie – Chemical and petroleum engineering*, 2006, vol. 7, pp. 31-33. (Rus.)
5. RD 34.27.504-91. *Tipovaia instruktsiia po ekspluatatsii elektrofiltriv* [RD 34.27.504-91. Typical operating instructions for electrostatic precipitators]. Moscow, 1993. 44 p. (Rus.)
6. Chekalov L.V. *Katalog pyleulavlivaiushchego oborudovaniia* [Dust collection equipment catalog]. Iaroslavl', Kondor-Eko Publ., 2006. 240 p. (Rus.)
7. Bordacheva V.V., Valuev A.Y., Mylovydov Yu.S., Panev S.N., Tkachenko V.M. *Elektrofiltr* [Electric filter]. Certificate of authorship USSR, no. 584449, 1979. (Rus.)
8. Bilonyk I.M., Berehovenko M.M., Bilonyk D.I., Kapustian O.Ye., Smakohrai A.E., Shumykin S.O. Білоник І. М. Вибір матеріалу і способу зміцнення ударної частини молотків механізму струшування електрофільтрів [The choice of material and method of strengthening the impact part hammers of mechanism of shaking electrostatic precipitators]. *Visnik Priazovskogo Derzhavnogo Tekhnichnogo Universitetu. Seriia: Tekhnichni nauki – Reporter of the Priazovskiy State Technical University. Section: Technical sciences*, 2021, vol. 41, pp. 52-59. doi: 10.31498/2225-6733.41.2020.226182. (Ukr.)
9. Pymenov A.F. *Elektroshlakovaia naplavka* [Electroslag surfacing]. Moscow, Nauka i tekhnika Publ., 2001. 180 p. (Rus.)
10. Medovar B.Y., Saenko V.Ya., Nahaevskiy Y.D. Chepurnoi A.D. *Elektroshlakovaia tekhnologiya v mashinostroenii* [Electroslag technology in mechanical engineering]. Kyiv, Tekhnika Publ., 1984. 215 p. (Rus.)
11. ASTM E1245-03. Standard practice for determining the inclusion or second-phase constituent content of metals by automatic image analysis. 2016. 8 p.
12. Hryhorovych K.V., Krasovskiy P.V., Hrushnykova A.S. Analiz nemetallicheskih vkluchenii – osnova kontrolya kachestva stali i splavov [Analysis of non-metallic inclusions – the basis for quality control of steel and alloys]. *Analitika i kontrol – Analytics and control*, 2002, vol. 6, no. 2, pp. 133-135. (Rus.)
13. Lytvynova T.Y., Pyrozhkova V.P., Petrov A.K. *Petrografia nemetallicheskih vkluchenii* [Petrography of non-metallic inclusions]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1972. 184 p. (Rus.)
14. Lunev V.V. Priroda nemetallicheskih vkluchenii i svoistva stali. *Tezy dopovidi XII Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii «Nemetalichni vkraplennia i hazy u lyvarnykh splavakh»* [Nature of non-metallic inclusions and properties of steel. Abstracts of the 12th International Scientific and Technical Conference «Non-metallic inclusions and gases in casting alloys»]. Zaporozhe, 2012, p. 118. (Rus.)
15. Paton B.Ye., Medovar B.Y. *Elektroshlakovy metall* [Electroslag metal]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1981. 680 p. (Rus.)
16. Lunev V.V., Pyrozhkova V.Y., Hryshchenko S.H. *Nemetallicheskie vklucheniia v staliakh, chugunakh i ferrosplavakh* [Non-metallic inclusions in steels, cast irons and ferroalloys]. Zaporozhe, Dneprovskii metallurg Publ., 2006. 384 p. (Rus.)
17. Hubenko S.Y., Parusov V.V., Derevianchenko Y.V. *Nemetallicheskie vklucheniia v stali* [Non-

- metallic inclusions in steel]. Dnepropetrovsk, Art-Press Publ., 2005. 160 p. (Rus.)
18. Yasiukov V.V., Lysenko T.V., Parkhomenko E.A. Gazy i nemetallicheskie vklucheniia v stalnykh otlivkakh [Gases and non-metallic inclusions in steel castings]. *Metall i lite Ukrainy – Metal and casting of Ukraine*, 2017, vol. 11-12 (294-295), pp. 19-22. (Rus.)
19. Vynohrad M.Y., Hromova H.P. *Vkliucheniiia v legirovannykh staliakh i splavakh* [Inclusions in alloy steels and alloys]. Moscow, Metallurgiiia Publ., 1971. 216 p. (Rus.)

Рецензент: О.А. Мітяєв
д-р техн. наук, проф., НУ «Запорізька політехніка»

Стаття надійшла 29.03.2021

УДК 669.017.07

doi: 10.31498/2225-6733.42.2021.240568

© Гаврилова В.Г.*

МАТЕРІАЛОЗНАВЧА ЕКСПЕРТИЗА ЯК ЕЛЕМЕНТ ЗАГАЛЬНОЇ ОЦІНКИ СТАНУ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

Виконано оглядовий аналіз методів матеріалознавчої експертизи як найважливішої частини загальної інженерно-технологічної експертизи транспортних засобів. Узагальнені та сформульовані завдання в ході проведення експертних заходів, питання, які вирішує експерт з метою виявлення дефектів матеріалів та встановлення причин їх утворення. Показано доцільність проведення спеціальних досліджень та роль фрактографії у цьому процесі. Систематизовані та класифіковані види дефектів деталей автомобілів, внаслідок яких виникає руйнування. Охарактеризовані умови проведення експертних випробувань залежно від конкретних ситуацій. Результати роботи рекомендується застосовувати для розробки навчального курсу «Експертиза матеріалів», а також при викладанні курсів «Матеріали для застосування на транспорті» та «Механічні властивості матеріалів».

Ключові слова: матеріалознавча експертиза, автоекспертиза, аварійний стан, руйнування, навантаження, дефекти деталей, методи випробування матеріалів, експертна оцінка, фрактографія.

V.G. Gavrylova. Material science expertise as an element of the overall assessment of the condition of vehicles. *A review analysis of the methods of material science expertise, as the most significant part of the general engineering and technological expertise of vehicles, has been carried out. The areas of application of the results of materials science expertise are given. In the course of expert events the tasks and the questions issues that the expert solves with the help of organoleptic, diagnostic methods, special equipment for detecting defects in materials and establishing the causes of their formation, has been generalized and formulated. The expediency of special research and the role of fractography in this process are shown. The types of destructive and non-destructive control used in the examination are listed. A mandatory research plan is presented, including an assessment of the general condition of the research object, analysis of the apparent condition of destroyed parts, flaw detection, metallographic analysis, mechanical analysis, analysis of working conditions of parts, as well as generalization and analysis of research results and development of recommendations for preventing the causes of breakdowns and emergencies. The types of defects in car parts, caused the destruction, are systematized and classified: defects in material, defects in thermal and galvanic treatments, defects in mechanical processing and assembly. The conditions for conducting expert*

* канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, gavrilova_v_g@mail.ua

tests, depending on specific situations, are characterized. The results of the work are recommended to be used for the development of the training course «Materials expertise», as well as for teaching the courses «Materials for use in transport» and «Mechanical properties of materials».

Keywords: *materials science and automotive expertise, emergency condition, destruction, loads, defects of parts, materials testing methods, expert assessment, fractography.*

Постановка проблеми. Оскільки в науково-технічній літературі приділено недостатньо уваги оцінці ролі матеріалознавчої експертизи у загальному процесі проведення автоекспертизи, є необхідність поширення відомостей про основні заходи та методи експертних матеріалознавчих досліджень для встановлення причин аварій, ухвалення відповідальних технічних рішень, вирішення спірних питань.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Обсяг проведених експертиз транспортних засобів постійно зростає і в даний час ця послуга користується великим попитом. З автомобілями відбувається величезна кількість дій, вони потрапляють в аварії, ламаються, їх неякісно ремонтують, вони купуються і продаються, списуються і т. д. [1-3]. Технічна експертиза транспортних засобів проводиться з метою встановлення несправностей, дефектів і недоліків в вузлах, механізмах і агрегатах автомобіля (кузов, двигун, ходова частина, підвіска, електрообладнання, система протидії угону сигналізації й інш.), виявлення причин їх виникнення, встановлення причинно-наслідкового зв'язку між технічним станом автомобіля і аварією (ДТП) [4].

Руйнування деталей і частин транспортних засобів можуть бути не тільки наслідком аварії, але може відбуватися під дією різних навантажень, що у багатьох випадках супроводжуються корозійною і температурною дією, призводить до виходу з ладу відповідальних вузлів або навіть усієї конструкції або механізму в цілому. Тому останніми роками приділяється багато уваги роботам, в результаті яких проводиться вивчення процесу деформації і руйнування, залежно від механічних, фізичних і фізико-хімічних чинників. Проте, незважаючи на численні цінні результати цих робіт, причини руйнування і виходу з ладу механізмів, виготовлених з різних матеріалів, у багатьох випадках ще далеко не з'ясовані [5].

Невід'ємною та найбільш актуальною частиною автоекспертизи є проведення саме матеріалознавчої експертизи, яка дозволяє встановити причину руйнування деталей або частин транспортних засобів, зробити висновки про якість їх виготовлення або дати рекомендації щодо усунення проблем, які призвели до різних аварійних ситуацій [6-7].

В роботі [8] не досить конкретно обговорюються питання, пов'язані з вивченням процесів руйнування деталей транспортних засобів як наслідок аварійних ситуацій. Основний акцент зроблено на характеристику зламів зруйнованих деталей, але не систематизовані методи матеріалознавчої експертизи, які застосовуються у вказаних ситуаціях. У роботах [5, 9] визначені наслідки руйнування деталей при конкретних аварійних ситуаціях, коротко описуються основні принципи встановлення причин руйнування деталей, однак чітко не сформульовані питання, на які повинен дати відповідь експерт-матеріалознавець в процесі розв'язання складних завдань під час загальної оцінки стану транспортних засобів.

В науковій періодичній літературі достатньо повно описані методи автотехнічної експертизи [6-8, 10], проте недостатньо матеріалу, пов'язаного саме з експертизою матеріалів, не класифіковані й не систематизовані дефекти, внаслідок яких виникає руйнування деталей, не повністю приводяться основні методи, які використовуються під час проведення цього виду експертизи, не показана її роль у загальній інженерно-технологічній експертизі транспортних засобів.

Мета статті. Систематизувати та узагальнити завдання щодо експертів, основні методи експертизи матеріалів, виявити основні проблеми під час її проведення, показати роль матеріалознавчої експертизи у загальному процесі автоекспертизи, коли знань осіб, відповідальних за ухвалення рішень у сфері транспортного машинобудування, судочинства, освіти, буває недостатньо.

Виклад основного матеріалу. Автотехнічна експертиза являє собою один з видів інженерно-технологічної експертизи, основним завданням якої є визначення наявності несправностей в певному транспортному засобі або відсутність таких.

Результати такої експертизи використовуються в судах, органах дізнання і прокуратурі, а також запитуються фізичними і юридичними особами. Це комплекс заходів, які проводить експерт або фахівець з метою виявлення дефектів (недоліків), встановлює причини їх утворення і пропонує способи їх усунення. Експертний висновок, як правило, містить докладний опис діагностичних заходів і висновки фахівця відповідно до позначених переліком питань.

В ході проведення експертних заходів необхідно вирішити такі завдання:

- встановити технічний стан автотранспорту, окремих його систем і комплектуючих;
- з'ясувати причину появи поломки і можливість більш раннього її виявлення;
- встановити технічні можливості попередження аварії при певному технічному стані автотранспорту та його комплектуючих;
- встановити обставини, що стосуються технічного стану автотранспорту та можуть стати причиною ДТП.

Для отримання максимально точних результатів експерти вдаються до комплексного вивчення об'єктів, застосовуючи:

- органолептичний спосіб – візуальне дослідження автотранспорту, його систем і комплектуючих;
- діагностичні методи – проводиться як загальна діагностика, так і поелементна;
- спеціалізоване обладнання – прилади тестування та випробування різних систем;
- діагностичну апаратуру.

Значна частина в загальній оцінці технічного стану автомобілів належить матеріалознавчій експертизі, яка вважається найбільш складною в технічному виконанні, вимагає спеціального обладнання, а також високого рівня кваліфікації експерта, який має надати відповіді на наступні основні питання:

- Чи є на автотранспорті дефекти механізмів та деталей: двигуна, трансмісії, підвіски та інших комплектуючих?
- Що стало причиною виникнення виявлених дефектів?
- Чи можна було експлуатувати транспортний засіб з виявленим дефектом?
- Чи могло використання низькоякісного палива або неякісно виконання ремонтних робіт призвести до появи виявленої несправності?
- Чи є виявлений дефект заводським дефектом або виник в результаті експлуатаційного зносу деталей?
- Чи є ознаки неналежної експлуатації автомобіля, наприклад, сліди механічного впливу й інш.?
- Чи можна було виявити несправність до початку експлуатації транспортного засобу?
- Чи є ймовірність повторної появи поломки після ремонту через особливості конструкції або недоробки агрегату автомобіля?
- Чи могла виявлена несправність стати причиною аварії?

Для відповідей на зазначені питання експерту, в першу чергу, необхідно виконати ряд досліджень з метою виявлення дефектів деталей, до яких відносяться: металургійні, конструктивні, виробничі (технологічні) дефекти, механічні пошкодження поверхні і порушення режиму експлуатації, та встановлення причин їх утворення.

Це можуть бути:

- а) неправильна конструкція, наприклад, невірний крок різьби або занадто малий перетин, недостатній зазор;
- б) пошкодження при виготовленні, а саме: закати, волосовини, зварні тріщини;
- в) активне шкідливе середовище, наприклад, корозійна атмосфера;
- г) неправильний монтаж, наприклад, слабе кріплення;
- д) робота під навантаженням, що перевищує допустиму міцність деталі;
- е) ударні нештатні навантаження одноразового характеру й ін.

Всі вказані причини руйнування деталей автомобілей є наслідком їх дефектності. Основні дефекти, пов'язані з матеріалами, які застосовуються у процесі виготовлення деталей, можна узагальнити за даними [3-5] схемою (рис. 1).

За місцем розташування всі дефекти поділяють на зовнішні і внутрішні. Зовнішні, що утворилися в результаті деформації, поломки, зміни геометричної форми і розмірів, легко виявляють візуально або в результаті нескладних вимірів. Внутрішні дефекти, такі як втомні тріщи-

ни, тріщини термічної втоми й інш., виявляють різними методами макроаналізу деталей та фрактографією, в процесі яких виконується комплекс робіт, який полягає у виявленні та характеристиці дефектів, що мають місце в деталях.



Рис. 1 – Характерні дефекти деталей автомобілей

Узагальнення фактичного матеріалу по аналізу руйнувань деталей машин показує, що виробничо-технологічні причини поломок наступні:

- дефекти матеріалу;
- дефекти термічної і гальванічної обробок;
- дефекти механічної обробки;
- дефекти зборки.

При проведенні матеріалознавчої (металознавчої) експертизи транспортних засобів використовуються методи, які можна поділити на дві групи:

1. Методи руйнівного контролю – макро- і мікроскопічний аналіз за допомогою оптичних систем (визначення структурних параметрів матеріалу і визначення фазового складу):

- визначення хімічного складу матеріалу;
- растрова електронна мікроскопія (фрактографія);
- електронна мікроскопія;
- а) макрокопічний метод – спектральні способи і способи аналітичної хімії;
- б) мікроскопічні методи:
 - рентгеноспектральний мікроаналіз;
 - мас-спектроскопія і Оже-спектроскопія;
 - іонна і автоіонна мікроскопія.
- в) окремі механічні випробування.

2. Методи неруйнівного контролю (ультразвуковий дефектоскопічний аналіз, рентгеноструктурний, деякі способи спектрального аналізу) [5].

Перед початком проведення експертизи для встановлення причин поломок деталей обов'язково складається план дослідження, який містить п'ять основних пунктів:

- 1) оцінка загального стану об'єкта дослідження;
- 2) аналіз зовнішнього стану зруйнованих, пошкоджених або зв'язаних з ними деталей;
- 3) оцінка якості виготовлення і матеріалу деталі шляхом огляду, дефектоскопування, металографічних, механічних й інших досліджень;
- 4) аналіз умов роботи шляхом оцінки зовнішнього стану деталей, спостереження за роботою конструкції, машини або механізму до її поломки, натурних, стендових, експлуатацій-

них і спеціальних випробувань, розрахунків на міцність, експериментальних методів оцінки напруг і т. д.;

5) узагальнення і аналіз результатів досліджень і розробка рекомендацій по попередженню причин, що викликають поломки та аварійні ситуації [4].

Велику роль перед встановленням причин виникнення аварійного стану деталей має аналіз умов їх роботи, який обов'язково проводиться у всіх аварійних випадках і який включає оцінку конструктивних, виробничо-технологічних і експлуатаційних чинників.

Наприклад, поломки деталей внаслідок недостатньої міцності характеризуються, як правило, малим терміном служби. Іноді недостатня міцність може проявлятися тільки після тривалої роботи, коли збільшується діюча напруга або погіршуються механічні властивості матеріалу внаслідок зносу або при роботі деталі в умовах підвищених або низьких температур, й інших випадках. Внаслідок неправильного підбору матеріалу пар, що труться, дотичні поверхні деталей можуть зношуватися, піддаватися корозії тертя. У цьому випадку неправильне призначення проміжків призводить до того, що деталі зачіпають одна за одну або перевантажуються.

При оцінці якості виготовлення і матеріалу деталі виконують:

- 1) вимір деталей з метою встановлення їх відповідності вимогам технічних умов;
- 2) оцінку якості обробки поверхні;
- 3) дослідження методами дефектоскопії для виявлення тріщин і металургійних дефектів;
- 4) перевірку якості матеріалу для встановлення відповідності його механічних властивостей вимогам, що пред'являються.

Дефектоскопування пошкоджених деталей дозволяє оглядати їх візуально, а також за допомогою лупи або бінокулярного мікроскопа. Дослідження якості матеріалу включає стандартні механічні випробування, металографічний і хімічний аналізи, а також різні технологічні й інші проби матеріалу. Аналіз зовнішнього стану зруйнованих або пошкоджених деталей необхідно розпочинати з виявлення частини механізму, що зруйнувалася першою. Після цього встановлюється послідовність руйнування усіх деталей і виявлення місць концентраторів напруги і зародження зламів. Велике значення має розрахунок діючих навантажень, ступеня перевантаження при повторних вантаженнях і виявлення відхилень від норми в роботі деталі, що зруйнувалася. Отже, дослідження зламів є одним з найважливіших методів при виявленні причин руйнування деталей.

Причинами руйнування деталей в процесі експлуатації може бути утворення тріщин в металевих деталях через прикладені навантаження, вищі за допустимі. При цьому злам деталі може мати крихкий характер або в'язкий. Це залежить від структури і властивостей металу.

Наприклад, при термообробці деталей можуть утворюватися тріщини і мікротріщини через нерівномірний нагрів деталей, особливо тих, що мають складну форму, де є різкі переходи від масивних частин до частин малого перетину. Тріщини можуть утворюватися на самому початку при нагріві деталі або у кінці термообробки при прискореному охолодженні [7].

Найбільш ефективним методом матеріалознавчої експертизи є фрактографія (прикладі наведені на рис. 2), що виконується за допомогою растрового електронного мікроскопу [5, 7].

Параметри експлуатаційних руйнувань, які можуть бути виявлені фрактографічно:

- дослідження форми і поверхні деталі;
- визначення первинного місця руйнування і траєкторії поширення тріщини;
- розташування зони зародження, росту тріщини та долома;
- визначення характеру навантаження: динамічний, статичний або циклічний;
- дослідження виду зламу деталі, характер руйнування: втомне, статичне або динамічне; співвідношення частки в'язкого, крихкого руйнування в зламі або змішаного;
- наявність розшарування, неприпустимих включень та інших ознак дефектів матеріалу, описаних в атласах фрактограм.

Взагалі, фрактографічний метод дозволяє кваліфікувати механізм руйнування та встановити його причину.

В проведенні експертизи слід відмітити окрему роль методів контролю зварних з'єднань, до яких також відносяться механічні випробування, металографічні, хімічні та фізичні методи дослідження, рентгенівські, магнітні методи, а також індукційний метод та ультразвукова дефектоскопія.

На підставі висновків за результатами дослідження і висновків про причину виходу дета-

лей з ладу розробляються рекомендації по попередженню подібних поломок надалі. Остаточний висновок про причини руйнування, у більшості випадків, може бути зроблений тільки після узагальнення усіх результатів дослідження. Розробка заходів з попередження аналогічних проблем є завершальним етапом матеріалознавчої експертизи.

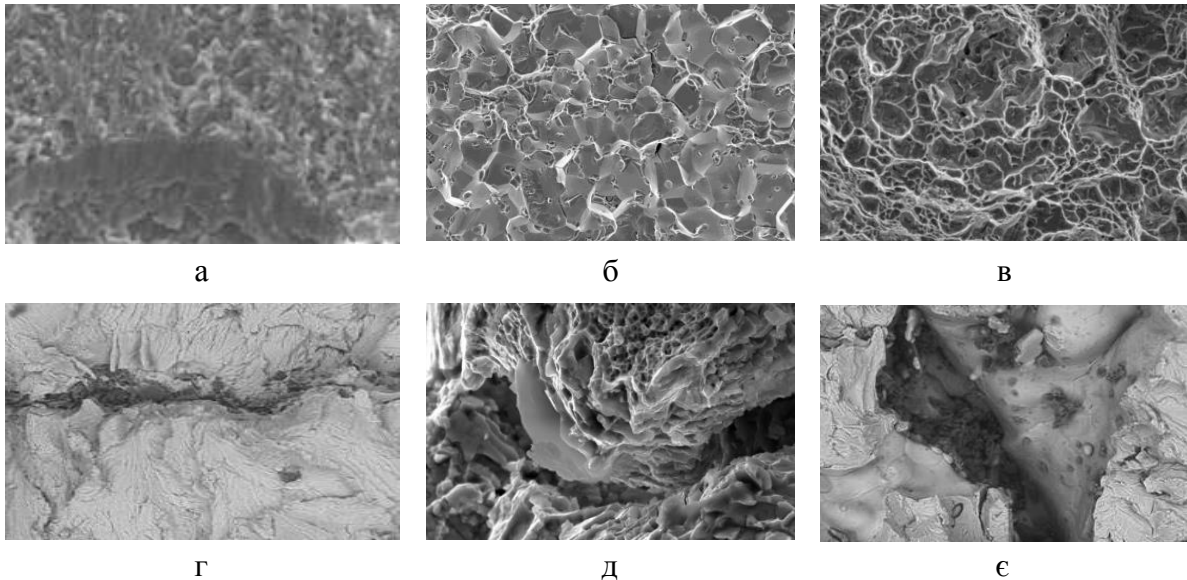


Рис. 2 – Мікрофрактограми деяких процесів руйнування, $\times 2250$ [5, 7]: а – втомне руйнування; б – міжзеренне руйнування; в – внутрішньозеренне руйнування; г – зона квазікрихкого руйнування; д – розвиток тріщини квазісколу; е – зона поширення тріщини

Для висококваліфікованого проведення матеріалознавчої експертизи необхідна якісна підготовка студентів, які навчаються за спеціальністю 132 «Матеріалознавство». Для цього вони повинні набути необхідні знання шляхом вивчення спеціальних курсів, що дозволить їм набути достатній досвід експертної праці, а також стати затребуваними та конкурентноздатними на ринку праці.

Висновки

1. В роботі показана роль матеріалознавчої експертизи, яка є невід'ємною та найбільш актуальною частиною технічної автоекспертизи, обов'язковою при вирішенні спірних питань, пов'язаних з руйнуванням механізмів і виникненням аварійних ситуацій.
2. Узагальнені та класифіковані завдання в ході проведення експертних заходів, питання, які вирішує експерт-матеріалознавець.
3. Виконано оглядовий аналіз методів матеріалознавчої експертизи, умови її проведення та роль фрактографії у цьому процесі.
4. Систематизовані та узагальнені види дефектів деталей автомобілів, які можуть стати причиною аварійних ситуацій;
5. Результати роботи рекомендується застосовувати для розробки навчального курсу «Експертиза матеріалів» та при викладанні курсів «Матеріали для застосування на транспорті» і «Механічні властивості матеріалів».

Перелік використаних джерел:

1. Экспертиза металлов и сплавов: особенности, описание и требования [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: <http://www.alfa-industry.ru/news/115/96188/>. – Название с экрана.
2. Сквирский В.Я. Экспертиза: теория, технология, практика / В.Я. Сквирский. – М. : Прогресс, 1994. – 284 с.

3. Материаловедение на автомобильном транспорте : учебник для студ. ВУЗов / П.А. Колесник, В.С. Кланица. – 2-е изд., стер. – М. : Издательский центр «Академия», 2007. – 320 с.
4. Гарькина И.А. Этапы проведения технической экспертизы / И.А. Гарькина, И.Н. Гарькин // Научное обозрение. Технические науки. – 2017. – № 1. – С. 59-64.
5. Куцова В.З. Экспертиза матеріалів та металів : навчальний посібник / В.З. Куцова, Н.М. Федоркова. – Дніпропетровськ : НМетАУ, 2015. – 51 с.
6. Струве Н.Э. Методика выбора конструкционных материалов для типовых деталей автомобилей : учебное пособие / Н.Э. Струве. – М.: МАДИ, 1989. – 88 с.
7. Шестопалова Л.П. Методы исследования материалов и деталей машин при проведении автотехнической экспертизы : учебное пособие / Л.П. Шестопалова, Т.Е. Лихачева. – М. : МАДИ, 2017. – 180 с.
8. Павлов А.Н. Методы обработки экспериментальной информации : учебное пособие / А.Н. Павлов, В.В. Соколов. – СПб. : ГУАП, 2005. – 42 с.
9. Davies G. Materials for Automobile Bodies / G. Davies. – Oxford : Linacre House, Jordan Hill, 2003. – 368 p. – Mode of access : <http://en.bookfi.net/book/1358476>.
10. Исследование недостатков легковых автомобилей отечественных моделей, находящихся в эксплуатации : методическое руководство для экспертов и судей. – М. : СУДЭКС, 2006. – 41 с.

References:

1. *Ekspertiza metallov i splavov: osobennosti, opisanie i trebovaniia* [Expertise of metals and alloys: features, description and requirements] Available at: www.monateka.com/article/294283 (accessed 28 April 2019).
2. Skvirsky V.Ya. *Expertise, teoriya, tehnologiya, praktika* [The expertise: theory, technology, practice]. Moscow, Progress Publ., 1994. 284 p. (Rus.)
3. Kolesnik P.A., Klanitsa V.S. *Materialovedenie na avtomobil'nom transporte : uchebnik dlia stud. vyssh. ucheb. zavedenii* [Materials science in road transport: a textbook for students of higher study institutions]. Moscow, Academy Publ., 2007. 320 p. (Rus.)
4. Garkina I.A., Garkin I.N. *Etapy provedeniia tekhnicheskoi ekspertizy* [Stages of technical expertise]. *Nauchnoe obozrenie. Tekhnicheskie nauki – Scientific Review. Technical sciences*, 2017, no. 1, pp. 59-64. (Rus.)
5. Kutsova V.Z., Fedorkova N.M. *Ekspertiza materialiv ta metaliv: navch. posibnik* [Expertise of materials and metals: tutorial]. Dnipropetrovsk, NMetAU Publ., 2015. 52 p. (Ukr.)
6. Struve N.E. *Metodica vybora konstrukcionnyh materialov dlya tipovyh detaley avtomobiley: ucheb. posobie* [Methodology for the selection of structural materials for typical car parts: tutorial]. Moscow, MADI Publ., 1989. 88 p. (Rus.)
7. Shestopalova L.P., Likhacheva T.E. *Metody issledovaniya materialov i detaley mashin pri provedenii avtotekhnicheskoy ekspertizy: ucheb. posobie* [Methods for the study of materials and machine parts when carrying out an auto-technical expertise: tutorial]. Moscow, MADI Publ., 2017. 180 p. (Rus.)
8. Pavlov A.N., Sokolov V.V. *Metody obrabotki eksperimentalnyh dannyh* [Methods of experimental information processing: tutorial]. – St. Petersburg, GUAP Publ., 2005. 42 p. (Rus.)
9. Davies G. *Materials for Automobile Bodies*. Oxford, Linacre House, Jordan Hill Publ., 2003. 368 p. Available at: <https://www.twirpx.com/file/1491843/> (accessed 15 January 2021).
10. *Issledovaniye nedostatkov legkovykh avtomobiley otechestvennykh modeley, nahodyashihsy v ekspluatatsii: metodicheskoe rukovodstvo dlia ekspertov i sudei* [Investigation of the shortcomings of passenger cars of domestic models in service: Methodological guide for experts and judges]. Moscow, SUDEX Publ., 2006. 41 p. (Rus.)

Рецензент: В.Г. Єфременко
д-р техн. наук, проф., ДВНЗ «ПДТУ»

Стаття надійшла 14.04.2021

**ВПЛИВ Q&P-ОБРОБКИ НА МІКРОСТРУКТУРУ ТА МЕХАНІЧНІ
ВЛАСТИВОСТІ НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВОЇ TRIP-ASSISTED СТАЛІ**

В статті розглянуто вплив термічної обробки за технологією «Quenching-and-Partitioning» (Q&P) на фазово-структурний стан та механічні властивості низьколегованої TRIP-assisted сталі 20С2Г2Б. Встановлено, що Q&P-обробка із аустенітизацією у межкритичному інтервалі (МКІ) температур із гартувальним охолодженням до 200 °С і наступною витримкою при 350-400 °С впродовж 5-20 хв істотно підвищує пластичність в порівнянні зі стандартною термічною обробкою низьковуглецевих TRIP-assisted сталей. Q&P-термообробка з аустенітизацією в однофазному інтервалі температур із гартувальним охолодженням до 235 °С і наступною витримкою при 350-400 °С впродовж 5-20 хв забезпечує зростання показників міцності та ударної в'язкості сталі. Найбільш високий комплекс механічних властивостей (PSE \approx 20 ГПа %) забезпечується МКІ/Q&P обробкою з витримкою при 400 °С впродовж 5 хв та 20 хв. Поліпшення механічних властивостей пов'язується із формуванням багатофазної мікроструктури, яка містить підвищену кількість залишкового аустеніту, та зі здатністю аустеніту до прояву TRIP-ефекту.

Ключові слова: TRIP-ефект, Q&P-обробка, ферит, мартенсит, аустеніт, міцність, пластичність, ударна в'язкість.

R.O. Kussa. Effect of Q&P treatment on microstructure and mechanical properties of low-carbon TRIP-assisted steel. The article describes the effect of heat treatment according the «Quenching and Partitioning» (Q&P) technology on the phase-structural status and mechanical properties of low-alloy 20Si2Mn2Nb steel. It is found that the standard heat treatment which is an isothermal annealing at 300 °C (holding for 20 min) after heating in intercritical temperature range (ITR) provides a moderate complex of mechanical properties at low impact toughness. The heat treatment according to the ITR/Q&P scheme (austenitization in intercritical temperature range with a quenching cooling to 200 °C and subsequent holding at 350-400 °C for 5-20 min) significantly increases the ductile behavior of low carbon TRIP-assisted steels compared to its standard heat treatment. The positive effect of ITR/Q&P heat treatment on steel ductility was caused by the presence of high content of ductile ferrite (54,4 vol. %) in the steel structure. Heat treatment according to the FA/Q&P scheme (FA-full austenitization) with quenching cooling to 235 °C and subsequent holding at 350-400 °C for 5-20 minutes provided a considerable increase in the strength properties and impact toughness of steel. High strength level was ensured by the formation of a multiphase structure with a high volume fraction of hard martensite phase. The maximum combination of strength and ductility (PSE \approx 20 GPa-%) was provided by ITR/Q&P treatment conducted according to modes $A_{770}Q_{200}P_{400}(5 \text{ min})$ and $A_{770}Q_{200}P_{400}(20 \text{ min})$. The improvement in mechanical properties was associated with the formation of multiphase micro-structure which contains an increased amount of retained austenite. It is shown that Q&P treatment with heating in the intercritical temperature range notably improved a steel ability to work-hardening under cold plastic deformation.

Keywords: Q&P-treatment, ferrite, martensite, austenite, strength, ductility, impact toughness.

Постановка проблеми і аналіз відомих публікацій. В даний час в автомобілебудівній галузі чітко простежується тенденція зниження маси авто, в тому числі за рахунок зниження

* аспірант, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь

металоємності кузова [1]. Це обумовлено прагненням провідних виробників автомобільної техніки до скорочення витрати палива, і, отже, зниження викидів вихлопних газів в атмосферу. Разом з тим, при зниженні маси автомобіля необхідно зберегти міцність і експлуатаційні характеристики на колишньому рівні, що реалізується використанням сучасних високоміцних сталей [2]. Одним з найбільш перспективних для широкого промислового застосування класів високоміцних сталей є низьковуглецеві TRIP-assisted сталі, високий комплекс властивостей яких досягається шляхом реалізації деформаційного мартенситного перетворення (ДМП) залишкового аустеніту при виробництві або експлуатації сталевих виробів (так званий TRIP-ефект: Transformation Induced Plasticity – пластичність, наведена перетворенням) [3]. Перетворення метастабільного аустеніту є ефективним шляхом покращення комплексу механічних, трибологічних, технологічних та експлуатаційних властивостей сталей та чавунів [4-10].

Технологія виробництва таких сталей ґрунтується на концепції, запропонованій Matsumura в 80-х роках минулого століття [11], яка активно розвивається в даний час. Легування TRIP-assisted сталей є економічним, і в той же час воно спрямоване на пригнічення формування цементитних карбідів шляхом введення до складу 1-2% кремнію та/або алюмінію [12]. В результаті термічної обробки (загартування з міжкритичного інтервалу температур (МКІ) та подальшої ізотермічної витримки в бейнітному інтервалі) формується мікроструктура, що складається з 40-60% фериту, бейніту і підвищеної об'ємної частки залишкового аустеніту, схильного до ДМП [12]. Разом з тим, з огляду на високий вміст фериту міцність таких сталей, як правило, обмежена ≈ 1000 МПа [13].

Підвищення міцності подібних сталей можливо вирішити застосуванням інноваційної технології термічної обробки під назвою «Quenching and Partitioning» (скорочено Q&P), запропонованої Speer в 2003 році [14, 15]. Q&P-обробка проводиться в кілька етапів. Після аустенітизації (А) сталь охолоджують до температури «Quenching» (Q), яка знаходиться між точками M_S і M_F , для отримання в структурі певної кількості міцного мартенситу. Після цього сталь витримують при температурі «Partitioning» (P), яка, як правило, знаходиться вище точки M_S . Під час витримки відбувається дифузійний перерозподіл вуглецю між мартенситом і аустенітом, із збагаченням останнього, який стає стабільним до мартенситного перетворення. Якщо витримка на стадії «P» була досить довгою, переохолоджений аустеніт може частково або повністю перетворитися в бейніт [16]. Термічна обробка закінчується охолодженням до кімнатної температури, приводячи до формування багатофазного стану з високою об'ємною часткою мартенситу різного ступеня відпуску і підвищеною кількістю метастабільного аустеніту. Дана мікроструктура забезпечує підвищені (щодо стандартної технології обробки TRIP-assisted сталей) властивості міцності при збереженні високої пластичності. Вплив параметрів Q&P-обробки на мікроструктуру і механічні властивості низьковуглецевої TRIP-assisted сталі вимагає додаткового дослідження, що є предметом даної статті.

Метою роботи було дослідження впливу термічної обробки за технологією «Quenching and Partitioning» на фазово-структурний стан і механічні властивості низьковуглецевої ($\sim 0,2\%$ C) TRIP-assisted сталі.

Методика досліджень. В якості матеріалу використали низьколеговану конструкційну сталь лабораторної виплавки умовної марки 20C2Г2Б хімічного складу: 0,18% C; 1,50% Si; 1,80% Mn; 0,055% Nb; 0,01% S; 0,01% P. Сталь виплавили в 60-кг індукційній печі та розлили в зливки діаметром 50 мм, які кували, а потім прокатували в смугу товщиною 15 мм. Після відпалу при 900°C зі смуги виготовили зразки для подальших досліджень. Критичні точки A_1 , A_3 і M_S , а також фазовий склад під час нагрівання в МКІ для даної сталі визначали моделюванням за допомогою комп'ютерної програми JMatPro. Згідно з отриманою моделлю, положення точок A_1 і A_3 становило 850°C і 716°C відповідно. Температура початку мартенситного перетворення в разі повної аустенітизації становила 377°C, а при нагріванні до 770°C вона знизилася до 272°C в зв'язку зі збагаченням аустеніту вуглецем при витримці в МКІ (при 770°C об'ємна частка фериту в сталі 20C2Г2Б становила 54,4%, що відповідало вимогам, які пред'являють до класичної структури TRIP-assisted сталі).

Спираючись на отримані дані, а також використовуючи методику розрахунку оптимальної температури переривання гартувального охолодження за концепцією «Constrained Carbon Para-Equilibrium» [14, 15], були обрані параметри режиму Q&P-обробки. При обробці за режи-

мом МКІ/Q&P (рис. 1, а) зразки нагрівали до 770°C (10 хв), потім охолоджували в рідкому сплаві Вуда з температурою 200°C (1 хв) (стадія Quenching), а далі витримували при 350°C (400°C) впродовж 5-20 хв (стадія Partitioning), після чого слідувало охолодження на повітрі. Обробка за режимом ПА/Q&P (рис. 1, б) відрізнялася повною аустенізацією (ПА), яку провели при 900°C (10 хв), і гартувальним охолодженням до 235°C. Третю (порівняльну) групу зразків піддали класичній для низьковуглецевих TRIP-assisted сталей ізотермічній обробці (ІЗО) в бейнітному інтервалі температур: нагрів в МКІ (770°C, 10 хв), перенос у ванну сплаву ПОС-61 для витримки при 300°C впродовж 20 хв та остаточне охолодження на повітрі (режим ІЗО).

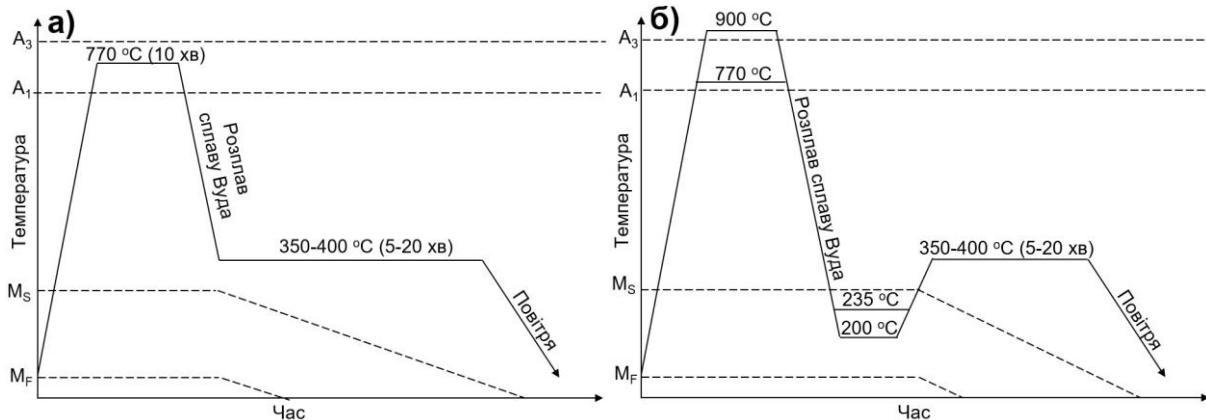


Рис. 1 – Графіки термічної обробки сталі 20C2Г2Б за схемами: а – ІЗО; б – Q&P

Випробування на розтяг проводили на універсальній сервоприводній машині UIT STM 100S згідно ГОСТ 1497-84 на зразках з діаметром 5 мм. Випробування на ударний вигин виконували згідно ГОСТ 9454-78 на зразках розміром 7×10×55мм з V-подібним надрізом при кімнатній температурі. Твердість заміряли за методом Роквелла (шкала С). Мікроструктуру досліджували за допомогою оптичного мікроскопа Axiovert 40 MAT.

Виклад основного матеріалу. Термічна обробка за схемою ІЗО привела до формування в сталі 20C2Г2Б ферито-бейнітної мікроструктури (рис. 2, а). Бейнітна структурна складова чітко ідентифікується по пакетам паралельно розташованих рейок α -фази (показано стрілкою на рис. 2, а), характерних для бейніту низьковуглецевих сталей [17].

Після проведення МКІ/Q&P обробки (рис. 2, б-г) в сталі значно зменшився розмір структурних складових у порівнянні з ІЗО. Це пояснюється формуванням мартенситу на стадії Quenching, рейки якого дроблять вихідне зерно аустеніту на окремі «субзерна» [18], в результаті чого розмір бейнітних рейок, що виникають на пізнішій стадії термічної обробки, визначається розмірами отриманих «субзерен». При зростанні витримки на стадіях Partitioning (рис. 2, в, г) структура стає більш контрастною, що може бути пов'язано з виділенням цементитних карбідів всередині рейок α -фази, що посилює розтравленість сталі. Формування карбідів могло відбуватися як при відпуску (розпаді) мартенситу гартування, отриманого на стадії Quenching, так і в ході бейнітного перетворення аустеніту. ПА/Q&P-обробка за режимом $A_{900}Q_{235}P_{350}$ (5 хв) (рис. 2, д) привела до формування дрібнозернистої мартенситно-бейнітної структури за повної відсутності фериту. Збільшення часу витримки до 20 хв (рис. 2, е) не викликало якісних змін мікроструктури, які могли б бути зафіксовані при використаному збільшенні (1000 разів).

Після термічної обробки зразки були піддані механічним випробуванням на розтягнення і ударний вигин. Як випливає з рис. 3, сталь 20C2Г2Б після ізотермічної обробки має досить високу міцність ($\sigma_b = 1009$ МПа, $\sigma_{0,2} = 660$ МПа) при середній пластичності ($\delta = 13,5\%$) і вкрай низькій для низьковуглецевих сталей ударній в'язкості (8 Дж/см²). Така низька ударна в'язкість пояснюється насиченням аустеніту вуглецем при витримці в міжкритичному інтервалі температур. В процесі ізотермічної витримки високовуглецевий аустеніт розпадається з виділенням карбідів по межах зерен, або, будучи стабільним до бейнітного перетворення, перетворюється в високовуглецевий мартенсит при охолодженні (обидва чинники викликають окрихчення сталі).

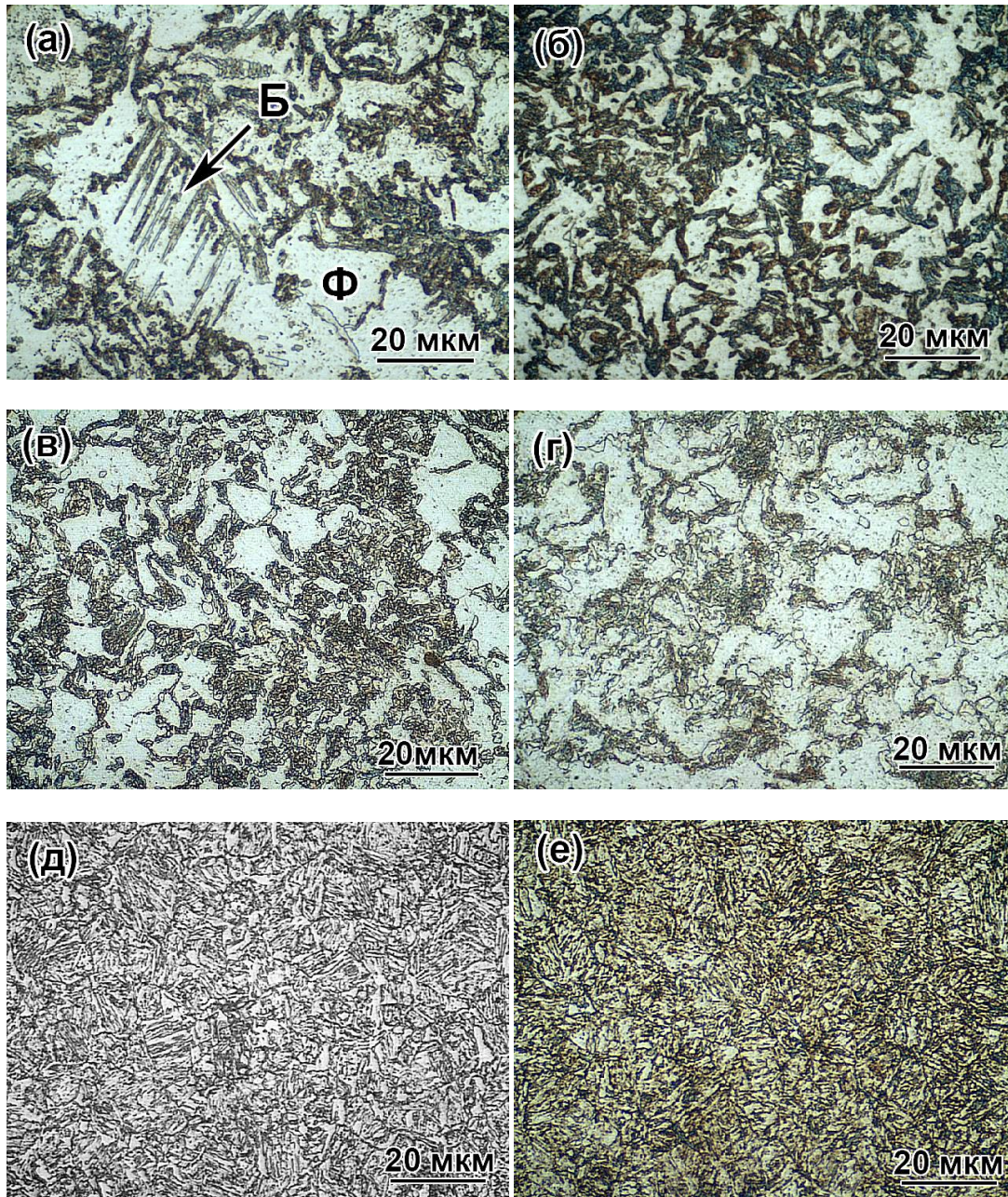


Рис. 2 – Мікроструктура сталі 20Г2С2Б після обробки за режимами: а – ІЗО; б – $A_{770}Q_{200}P_{350}$ (5 хв); в – $A_{770}Q_{200}P_{350}$ (20 хв); г – $A_{770}Q_{200}P_{400}$ (20 хв); д – $A_{900}Q_{235}P_{350}$ (5 хв); е – $A_{900}Q_{235}P_{350}$ (20 хв)

МКІ/Q&P-обробка забезпечила істотне зростання пластичності сталі (до 23,2%) при незначному зниженні рівня міцності (максимально на 15%) відносно ІЗО-обробки. При збільшенні температури і часу витримки межа міцності незначно знижується при збереженні (або незначному підвищенні) межі плинності. Мінімальні (для схеми МКІ/Q&P) значення відносного подовження (9,4%) були отримані обробкою з малою витримкою на стадії Partitioning ($A_{770}Q_{200}P_{350}$ (5 хв)). Зі зростанням температури і тривалості Partitioning пластичність зростала, досягаючи максимуму (23,2%) при $\sigma_b = 873$ МПа ($P = 400^\circ\text{C}$, 20 хв). Характер зміни ударної в'язкості відповідав зміні пластичності сталі: в цілому, значення $KCV_{20^\circ\text{C}}$ зразків, оброблених за схемою МКІ/Q&P, були в 1,13-4,5 рази вище, ніж у зразків ІЗО. Це пояснюється подрібненням мікроструктурних компонентів сталі, що, як відомо, безпосередньо впливає на ударну в'язкість, а також, імовірно, – збільшенням частки залишкового аустеніту внаслідок збагачення останнього вуглецем на стадії Partitioning [19, 20].

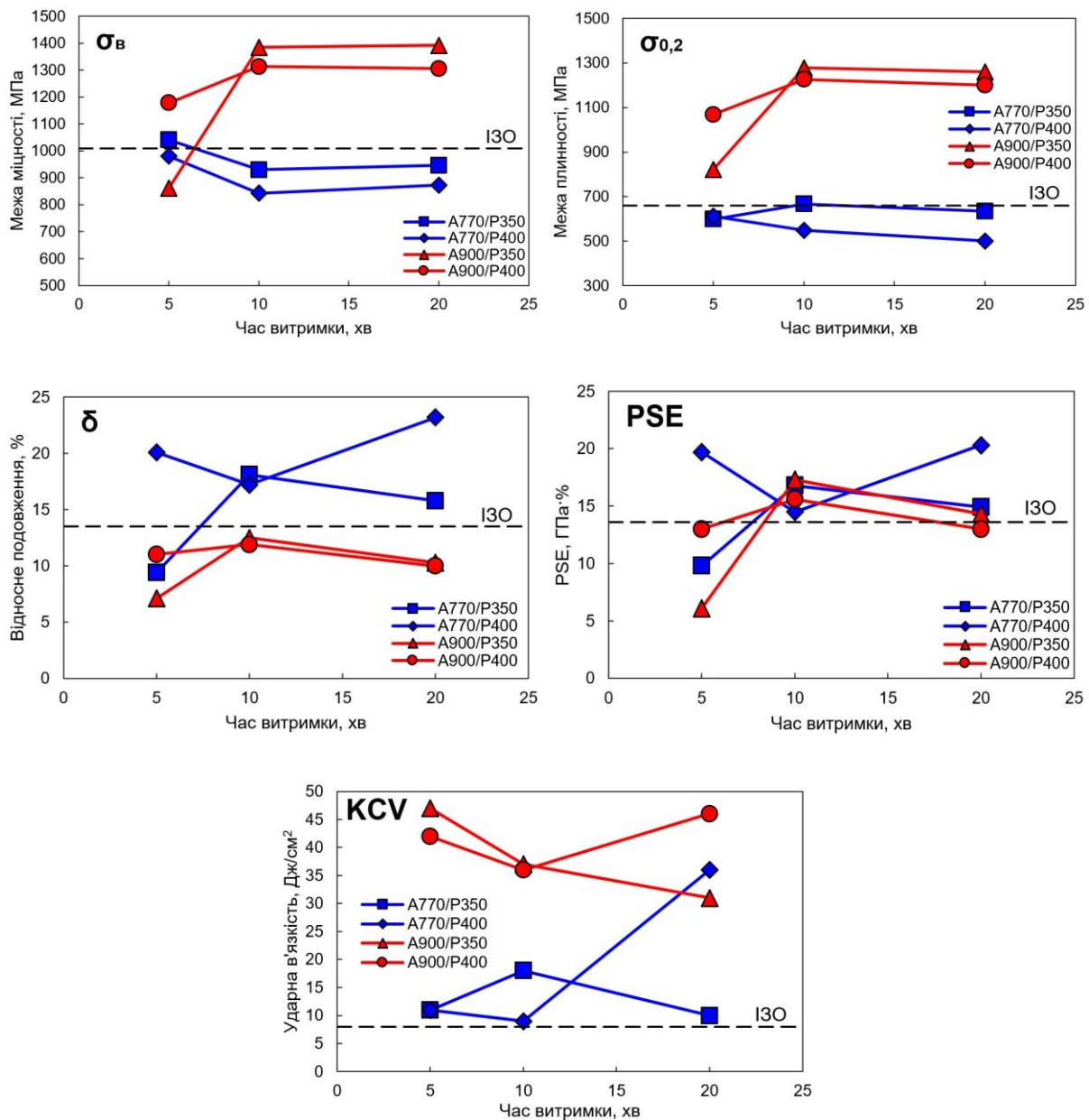


Рис. 3 – Механічні властивості сталі 20C2Г2Б після термічної обробки

Зразки, оброблені за схемою ПА/Q&P, продемонстрували в порівнянні з ІЗО-зразками більш високий рівень межі міцності (1178-1392 МПа) і межі плинності (1069-1277 МПа) при зниженні відносного подовження до 10-12,5%. Максимальну (для схеми ПА/Q&P) міцність ($\sigma_b = 1392$ МПа, $\sigma_{0,2} = 1259$ МПа) при подовженні 10,3% мали зразки, оброблені за режимом $A_{900}Q_{235}P_{350}$ (20 хв). Зростання характеристик міцності в разі обробки за схемою ПА/Q&P пояснюється виключенням пластичної феритної фази з мікроструктури сталі. При цьому досягнення досить високого відносного подовження обумовлено формуванням низьковуглецевого мартенситу та бейніту, а також підвищеною часткою залишкового аустеніту. Цим також можна пояснити і збільшення ударної в'язкості в 3,9-5,9 разів в порівнянні з ІЗО-обробкою.

Комплекс механічних властивостей оцінювали за допомогою параметра PSE (Product of Strength and Elongation), який обчислюється множенням межі міцності на відносне подовження сталі [21]. Максимальні значення параметра PSE (19,7 ГПа·% і 20,3 ГПа·%) були зафіксовані при реалізації МКІ/Q&P схеми, а конкретно – режимів $A_{770}Q_{200}P_{400}$ (5 хв) і $A_{770}Q_{200}P_{400}$ (20 хв), відповідно. Високий комплекс механічних властивостей в даному випадку обумовлений формуванням композиційної мікроструктури, що складається з міцних рейок α -фази, що виконують

армуючу функцію, і в'язких прошарків фериту і аустеніту (останній імовірно проявляє TRIP-ефект при деформації).

Досить важливою технологічною характеристикою низьковуглецевих TRIP-assisted сталей є здатність до зміцнення під час пластичної деформації, оскільки остаточний рівень механічних властивостей подібних сталей формується при штампуванні металовиробів. Здатність до зміцнення оцінювали різницею між межею міцності і межею плинності, а також відношенням $\sigma_{0,2}/\sigma_B$. З даних, представлених на рис. 4, випливає, що за ступенем схильності до зміцнення МКІ/Q&P-зразки значно перевершують ПА/Q&P-зразки ($\Delta\sigma = 263\text{-}442$ МПа і $40\text{-}133$ МПа, відповідно). Це пояснюється присутністю в структурі перших великої кількості пластичних фаз (ферит, аустеніт), які, з одного боку, знижують межу плинності (тобто збільшують різницю між $\sigma_{0,2}$ і σ_B), а, з іншого боку, виявляють здібність до деформаційного зміцнення при пластичній деформації. У разі МКІ/Q&P-обробки максимальну здатність до зміцнення мають зразки, які обробляли із невеликими витримками на стадії Partitioning. Це може бути пов'язано з метастабільністю залишкового аустеніту, який, з одного боку, знижує межу плинності сталі, а з іншого боку, під час деформації зазнає деформаційного мартенситного перетворення, що супроводжується зростанням межі міцності сталі. Зі збільшенням часу витримки на стадії Partitioning здатність сталі до зміцнення знижується, що пояснюється зменшенням частки залишкового аустеніту в міру розвитку бейнитного перетворення. На фінальних етапах витримки здатність до зміцнення сталі знову підвищується. Незважаючи на зменшення кількості залишкового аустеніту, його стабільність до ДМП зростає внаслідок насичення вуглецем в ході бейнитної реакції. Такий аустеніт витримує без мартенситного перетворення значну пластичну деформацію, яка доходить до стадії множинного ковзання дислокацій, що супроводжується максимальним деформаційним зміцненням металу [22].

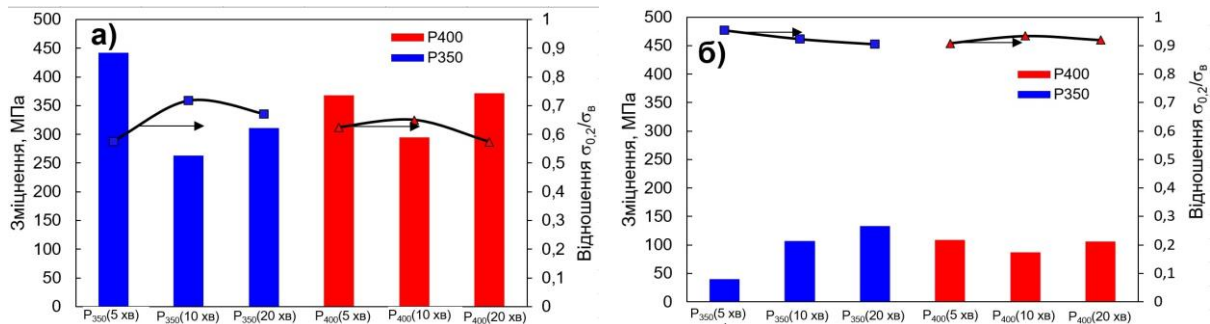


Рис. 4 – Здатність сталі 20C2Г2Б до деформаційного зміцнення після термічної обробки за схемами: а – МКІ/Q&P; б – ПА/Q&P

Представлені вище результати показують перспективність використання Q&P-обробки для підвищення комплексу механічних властивостей низьковуглецевої TRIP-assisted сталі 20C2Г2Б в порівнянні зі стандартною схемою їх термічної обробки. Це забезпечується формуванням гетерогенної мікроструктури, що складається з мартенситу, нижнього бейніту, фериту (при обробці з МКІ) і залишкового аустеніту.

За рівнем властивостей Q&P-оброблена сталь 20C2Г2Б повністю відповідає вимогам, що пред'являються до високоміцних AHSS сталей (Advanced High Strength Steel) першого покоління [23]. МКІ/Q&P-обробка актуальна до застосування в автомобілебудівній галузі при виробництві деталей з підвищеними вимогами до пластичності і здатності до штампування (наприклад, лицьових елементів кузова автомобіля). ПА/Q&P-обробка, в свою чергу, представляє інтерес при виробництві більш міцних компонентів автомобіля з підвищеними вимогами до ударної в'язкості (наприклад, елементи шасі і кріплення бампера).

Напрямок подальших досліджень в даній області є дослідження особливостей фазових перетворень при пластичній деформації і деформаційного зміцнення Q&P-оброблених зразків TRIP-assisted сталі шляхом електронно-мікроскопічного вивчення її тонкої структури.

Робота виконана в рамках проекту (0120U102087), що фінансується Міністерством освіти і науки України.

Висновки

1. В роботі досліджено вплив схеми термічної обробки (ізотермічної обробки з МКІ, Q&P-обробки з МКІ або однофазної аустенітної області) на мікроструктуру і механічні властивості економнолегованої TRIP-assisted сталі 20C2Г2Б. Встановлено, що застосування термічної обробки за схемою ІЗО (нагрів в МКІ з подальшою ізотермічною витримкою при 300°C, 20 хв) забезпечує сталі помірний комплекс механічних властивостей ($\sigma_b = 1009$ МПа, $\delta = 13,5\%$, PSE = 13,5 ГПа·%) при низькій ударній в'язкості (KCV = 8 Дж/см²).

2. Термічна обробка за схемою «Quenching-and-Partitioning» з аустенітизації в МКІ призвела до істотного збільшення відносного подовження (до 23,2%) і ударної в'язкості (9-36 Дж/см²) при збереженні досить високої міцності ($\sigma_b = 873$ МПа), що забезпечило найвищий рівень показника PSE (20,3 ГПа·%).

3. Q&P-обробка з нагрівом в однофазну область температур забезпечила сталі 20C2Г2Б різкий приріст міцності (σ_b – до 1392 МПа) при помірній пластичності ($\delta = 7,1-12,5\%$) і максимальній ударній в'язкості (KCV = 31-47 Дж/см²), що дозволяє використовувати сталь 20C2Г2Б при виробництві навантажених деталей, які зазнають ударні навантаження.

4. Встановлено, що термічна обробка за схемою МКІ/Q&P забезпечує сталі 20C2Г2Б високу здатність до зміцнення при холодній пластичній деформації, що є важливим для забезпечення високоміцного стану штампованих металовиробів.

Перелік використаних джерел:

1. Lesch C. Advanced high strength steels (AHSS) for automotive applications – tailored properties by smart microstructural adjustments / C. Lesch, N. Kwiaton, F.B. Klose // Steel Research International. – 2017. – № 88 (10). – P. 1700210. – Mode of access: <https://doi.org/10.1002/srin.201700210>.
2. Современные конструкционные стали с TRIP-эффектом / В.И. Зурнаджи [и др.] // Наука и прогресс транспорта. Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта. – 2020. – № 5 (89). – С. 80-92. – Mode of access: <https://doi.org/10.15802/stp2020>.
3. Bhadeshia H.K.D.H. TRIP-assisted steels? / H.K.D.H. Bhadeshia // ISIJ international. – 2002. – № 42 (9). – Pp. 1059-1060.
4. Mechanical properties of carbide-free lower bainite in complex-alloyed constructional steel: Effect of bainitizing treatment parameters / V.I. Zurnadzyh [etc.] // Kovove Mater. – 2020. – № 58. – Pp. 129-140. – Mode of access: https://doi.org/10.4149/km_2020_2_129.
5. Three-body abrasive wear behaviour of metastable spheroidal carbide cast irons with different chromium contents / V. Efremenko [etc.] // International Journal of Materials Research. – 2018. – № 109 (2). – Pp. 147-156. – Mode of access: <https://doi.org/10.3139/146.111583>.
6. Bainit in Stählen mit hohem Widerstand gegen Abrasivverschleiß (Bainite in Steels with High Resistance to Abrasive Wear) / O. Hesse [etc.] // Tribologie und Schmierungstechnik. – 2016. – № 63 (2). – Pp. 5-13.
7. Chabak Yu.G. Change of Secondary-Carbides' Nanostate in 14.5% Cr Cast Iron at High-Temperature Heating / Yu.G. Chabak, V.G. Efremenko // Metallofizika i Noveishie Tekhnologii. – 2012. – № 34. – P. 1205-1220.
8. Malinov L.S. Influence of isothermal quenching modes on the wear resistance of high-strength cast iron / L.S. Malinov, D.V. Burova, V.D. Gomanyuk, D.S. Semenov // Journal of Friction and Wear. – 2020. – № 41. – Pp. 129-133. – Mode of access: <https://doi.org/10.3103/S1068366620020087>.
9. Cheiliakh O.P. Implementation of physical effects in the operation of smart materials to form their properties / O.P. Cheiliakh, Ya.O. Cheiliakh // Progress in Physics of Metals. – 2020. – Vol. 21. – № 3. – Pp. 363-463. – Mode of access: <https://doi.org/10.15407/ufm.21.03.363>.
10. Malinov L.S. Impact of metastable austenite on the wear resistance of tool steel / L.S. Malinov, V.L. Malinov, D.V. Burova // Journal of Friction and Wear. – 2018. – № 39 (4). – Pp. 349-353. – Mode of access: <https://doi.org/10.3103/S1068366618040098>.
11. Matsumura O. Trip and its kinetic aspects in austempered 0.4 C-1.5 Si-0.8 Mn steel / O. Matsumura, Y. Sakuma, H. Takechi // Scripta Metallurgica. – 1987. – № 21 (10). – Pp. 1301-1306.
12. Bleck W. The TRIP effect and its application in cold formable sheet steels / W. Bleck, X. Guo,

- Y. Ma // *Steel Research International*. – 2017. – № 88 (10). – Pp. 1-10. – Mode of access: <https://doi.org/10.1002/srin.201700218>.
13. Austenite Transformation Behavior and Mechanical Properties of Constructional V, Nb-Alloyed TRIP-Assisted Steel / R. Kussa [etc.] // *Key Engineering Materials*. – 2020. – № 864. – Pp. 241-249. – Mode of access: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.864.241>.
 14. Speer J.G. Carbon partitioning into austenite after martensite transformation / J.G. Speer, D.K. Matlock, B.C. De Cooman, J.G. Schroth // *Acta Materialia*. – 2003. – № 51 (9). – Pp. 2611-2622.
 15. Speer J.G. Partitioning of carbon from supersaturated plates of ferrite, with application to steel processing and fundamentals of the bainite transformation / J.G. Speer, D.V. Edmonds, F.C. Rizzo, D.K. Matlock // *Current Opinion in Solid State and Materials Science*. – 2004. – № 8 (3-4). – Pp. 219-237.
 16. Correlation of isothermal bainite transformation and austenite stability in quenching and partitioning steels / S. Chen [etc.] // *Journal of Iron and Steel Research International*. – 2017. – № 24 (11). – Pp. 1095-1103. – Mode of access: [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(17\)30159-0](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(17)30159-0).
 17. Bhadeshia H.K.D.H. *Bainite in steels: theory and practice* / H.K.D.H. Bhadeshia. – CRC Press, 2015. – 616 p.
 18. Microstructure evolution and mechanical behavior of a novel hot-galvanized Q&P steel subjected to high-temperature short-time overaging treatment / Y. Wang [etc.] // *Materials Science and Engineering: A*. – 2020. – № 789. – Pp. 139665. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139665>.
 19. Effects of stress relief tempering on microstructure and tensile/impact behavior of quenched and partitioned commercial spring steel / V.I. Zurnadzy [etc.] // *Materials Science and Engineering: A*. – 2019. – № 745. – Pp. 307-318. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.12.106>.
 20. Tailoring strength/ductility combination in 2.5 wt% Si-alloyed middle carbon steel produced by the two-step QP treatment with a prolonged partitioning stage / V.I. Zurnadzy [etc.] // *Materials Science and Engineering: A*. – 2020. – № 791. – Pp. 139721. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139721>.
 21. High strength-elongation product of Nb-microalloyed low-carbon steel by a novel quenching-partitioning-tempering process / S. Zhou [etc.] // *Materials Science and Engineering: A*. – 2011. – № 528. – Pp. 8006-8012. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.07.008>.
 22. Золотаревский В.С. Механические свойства металлов / В.С. Золотаревский. – М. : МИСИС, 1998. – 400 с.
 23. Bhargava M. Forming limit diagram of Advanced High Strength Steels (AHSS) based on strain-path diagram / M. Bhargava, A. Tewari, S.K. Mishra // *Materials & Design*. – 2015. – № 85. – Pp. 149-155. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.06.147>.

References:

1. Lesch C., Kwiaton N., Klose F.B. Advanced high strength steels (AHSS) for automotive applications – tailored properties by smart microstructural adjustments. *Steel Research International*, 2017, no. 88 (10), pp. 1700210. doi: 10.1002/srin.201700210.
2. Zurnadzy V.I., Voloshin V.S., Kussa R.A., Efremenko V.G., Dzherenova A.V., Tsvetkova O.V. Sovremennye konstrukcionnye stali s TRIP-jeffektom [Modern structural steels with TRIP-effect]. *Nauka i progress transporta. Vestnik Dnepropetrovskogo nacional'nogo universiteta zheleznodorozhnogo transporta – Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 2020, no. 5 (89), pp. 80-92. doi: 10.15802/stp2020.
3. Bhadeshia H.K.D.H. TRIP-assisted steels? *ISIJ international*, 2002, no. 42 (9), pp. 1059-1060.
4. Zurnadzy V.I., Efremenko V.G., Petryshynets I., Shimizu K., Brykov M.N., Kushchenko I.V., Kudin V.V. Mechanical properties of carbide-free lower bainite in complex-alloyed constructional steel: Effect of bainitizing treatment parameters. *Kovove Mater*, 2020, no. 58, pp. 129-140. doi: 10.4149/km_2020_2_129.
5. Efremenko V., Shimizu K., Pastukhova T., Chabak Yu., Brykov M., Kusumoto K., Efremenko A. Three-body abrasive wear behaviour of metastable spheroidal carbide cast irons with different chromium contents. *International Journal of Materials Research*, 2018, no. 109 (2), pp. 147-156. doi: 10.3139/146.111583.
6. Hesse O., Liefeth J., Kunert M., Kapustyan A., Brykov M.N., Efremenko V.G. Bainite in stählen

- mit hohem Widerstand gegen abrasivverschleiss (Bainite in steels with high resistance to abrasive wear). *Tribologie und Schmierungstechnik*, 2016, no. 63 (2), pp. 5-13.
7. Chabak Yu.G., Efremenko V.G. Change of secondary-carbides' nanostate in 14.5% Cr cast iron at high-temperature heating. *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*, 2012, no. 34, pp. 1205-1220.
 8. Malinov L.S., Burova D.V., Gomanyuk V.D., Semenov D.S. Influence of isothermal quenching modes on the wear resistance of high-strength cast iron. *Journal of Friction and Wear*, 2020, no. 41, pp. 129-133. doi: **10.3103/S1068366620020087**.
 9. Cheiliakh O.P., Cheiliakh Ya.O. Implementation of physical effects in the operation of smart materials to form their properties. *Progress in Physics of Metals*, 2020, vol. 21, no. 3, pp. 363-463. doi: **10.15407/ufm.21.03.363**.
 10. Malinov L.S., Malinov V.L., Burova D.V. Impact of metastable austenite on the wear resistance of tool steel. *Journal of Friction and Wear*, 2018, no. 39 (4), pp. 349-353. doi: **10.3103/S1068366618040098**.
 11. Matsumura O., Sakuma Y., Takechi H. Trip and its kinetic aspects in austempered 0.4 C-1.5 Si-0.8 Mn steel. *Scripta Metallurgica*, 1987, no. 21 (10), pp. 1301-1306.
 12. Bleck W., Guo X., Ma Y. The TRIP effect and its application in cold formable sheet steels. *Steel Research International*, 2017, no. 88 (10), pp. 1-10. doi: **10.1002/srin.201700218**.
 13. Kussa R., Kushchenko I., Andilakhai V., Petryshynets I., Efremenko V., Zurnadzhy V. Austenite transformation behavior and mechanical properties of constructional V, Nb-alloyed TRIP-assisted steel. *Key Engineering Materials*, 2020, no. 864, pp. 241-249. doi: **10.4028/www.scientific.net/KEM.864.241**.
 14. Speer J.G., Matlock D.K., De Cooman B.C., Schroth J.G. Carbon partitioning into austenite after martensite transformation. *Acta Materialia*, 2003, no. 51 (9), pp. 2611-2622.
 15. Speer J.G., Edmonds D.V., Rizzo F.C., Matlock D.K. Partitioning of carbon from supersaturated plates of ferrite, with application to steel processing and fundamentals of the bainite transformation. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 2004, no. 8 (3-4), pp. 219-237.
 16. Chen S., Wang G.Z., Liu C., Wang C.C., Zhao X.M., Xu W. Correlation of isothermal bainite transformation and austenite stability in quenching and partitioning steels. *Journal of Iron and Steel Research International*, 2017, no. 24 (11), pp. 1095-1103. doi: **10.1016/S1006-706X(17)30159-0**.
 17. Bhadeshia H.K.D.H. *Bainite in steels: theory and practice*. CRC Press, 2015. 616 p.
 18. Wang Y., Xu Y., Liu R., Peng F., Gu X., Zhang T., Hou X., Sun, W. Microstructure evolution and mechanical behavior of a novel hot-galvanized Q&P steel subjected to high-temperature short-time overaging treatment. *Materials Science and Engineering: A*, 2020, no. 789, pp. 139665. doi: **10.1016/j.msea.2020.139665**.
 19. Zurnadzhy V.I., Efremenko V.G., Wu K.M., Azarkhov A.Y., Chabak Y.G., Greshta V.L., Isayev O.B., Pomazkov M.V. Effects of stress relief tempering on microstructure and tensile/impact behavior of quenched and partitioned commercial spring steel. *Materials Science and Engineering: A*, 2019, no. 745, pp. 307-318. doi: **10.1016/j.msea.2018.12.106**.
 20. Zurnadzhy V.I., Efremenko V.G., Wu K.M., Petryshynets I., Shimizu K., Zusin A.M., Brykov M.N., Andilakhai V.A. Tailoring strength/ductility combination in 2.5 wt% Si-alloyed middle carbon steel produced by the two-step QP treatment with a prolonged partitioning stage. *Materials Science and Engineering: A*, 2020, no. 791, pp. 139721. doi: **10.1016/j.msea.2020.139721**.
 21. Zhou S., Zhang K., Wang Y., Gu J.F., Rong Y.H. High strength-elongation product of Nb-microalloyed low-carbon steel by a novel quenching-partitioning-tempering process. *Materials Science and Engineering: A*, 2011, no. 528, pp. 8006-8012. doi: **10.1016/j.msea.2011.07.008**.
 22. Zolotarevskij V.S. *Mehanicheskie svoystva metallov* [Mechanical properties of metals]. Moscow: MISIS Publ., 1998. 400 p.
 23. Bhargava M., Tewari A., Mishra S.K. Forming limit diagram of advanced high strength steels (AHSS) based on strain-path diagram. *Materials & Design*, 2015, no. 85, pp. 149-155. doi: **10.1016/j.matdes.2015.06.147**.

Рецензент: С.Л. Макуров
д-р техн. наук, проф., ДВНЗ «ПДТУ»

Стаття надійшла 28.04.2021

ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 621.923.74

doi: 10.31498/2225-6733.42.2021.240570

© Бурлаков В.І.*

МОДЕЛЮВАННЯ ІНСТРУМЕНТА ПРИ ВІБРО-МАГНІТНО-АБРАЗИВНОМУ ОБРОБЛЕННІ І ВПЛИВ ЙОГО НА ЯКІСТЬ ОБРОБКИ НАДТВЕРДОЇ КЕРАМІКИ

Показано, що дослідженням проблеми фінішної обробки займалися багато учених, але поєднання вібраційної та електромагнітної складових, отримання процесу притирки деталей з надтвердої кераміки та достатньо високих показників з якості та продуктивності обробки не було зроблено. Суть досліджуваної обробки полягає в тому, що на оброблювальне середовище і заготовки, що поміщені в робочу камеру вібраційного верстата, впливає постійне магнітне поле, спрямоване перпендикулярно площині циркуляційного руху робочого середовища. Робоче середовище переміщується під дією вібрації, а феромагнітний абразив, гранули Al_2O_3 і штучні алмази (які утримуються на гранулах) орієнтуються уздовж магнітних силових ліній. Магнітні силові лінії проходять через робочу камеру у напрямку від одного полюса до іншого. Заготовки не співударяються при обробці завдяки щільному розташуванню абразиву. У статті обґрунтовано, що одну з провідних ролей у вібро-магнітно-абразивному обробленні відіграє різальний інструмент. Саме вибір феромагнітного інструменту сприяє підвищенню якості виробів з надтвердої кераміки. Так як провідну роль у формуванні різального інструменту відіграє магнітне поле, то основою різального інструменту буде феромагнітний матеріал, у якому і утримуватимуться гранули, на яких розташовані штучні алмази.

Ключові слова: вібро-магнітно-абразивне оброблення, вібро-магнітно-абразивний інструмент, якість оброблення, фероабразивний порошок, різальний інструмент, форма магнітно-абразивних зерен, різальна здатність.

V.I. Burlakov. Modelling of the tool at vibro-magnetic-abrasive processing and its influence on the quality of processing of super hard ceramics. It has been shown that many scientists were concerned with the problem of finishing treatment, but they haven't managed to connect oscillation and electromagnetic components, to obtain lapping of parts from super hard ceramics and to get high enough quality and productivity indexes of treatment. The essence of treatment consists in the fact that the permanent magnetic field directed perpendicular to the plane of circulation motion of working environment influences on the processing environment and half-finished products in the working chamber of the oscillation machine-tool. The working environment moves under the action of vibration, while the ferromagnetic abrasive, the granules of Al_2O_3 and artificial diamonds (that are held on the granules) are oriented along the magnetic lines. The magnetic lines pass through the working chamber from one pole to the other. The half-finished products do not hit each other at treatment due to the dense location of the abrasive. Distance between the inner planes of the opposite walls of the working chamber in the direction from the electromagnet makes it possible to process the half-finished products of greater configuration, than the cutting plate of the tool, but it was not the task of that research. The half-finished products placed in the working chamber occupy free position. The half-finished products move along the columns of abrasive tool and due to the influence of vibration that assists the even removing of material, in the direction perpendicular to the lines of force of the magnetic-field, with the speed that equals to the vibration speed act-

* канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь

ing on them. It provides the even removal of material, as half-finished products move in succession from the bottom to the top of the working chamber with approximately identical intensity of treatment. The electromagnets are permanent and the field, caused by them, keeps the lines of force integrate, thus, the «instrument» remains constantly space-stabilized. Moving half-finished products along the lines results in lapping. The article shows that the cutting tool plays a leading role in vibro-magnetic-abrasive treatment. It is the choice of ferromagnetic instrument that promotes the quality increase of the items of superhard ceramics. As the magnetic field plays the leading role in shaping the cutting tool, the basis of the cutting tool will be ferromagnetic material holding Al_2O_3 granules on which artificial diamonds are located.

Keywords: vibro-magnetic-abrasive treatment, vibro-magnetic-abrasive tool, quality of treatment, ferroabrasive powder, cutting tool, the shape of magnetic - abrasive grains, cutting ability.

Постановка проблеми. Актуальним науково-технічним завданням є вибір абразивного інструменту, який буде основою при вібро-магнітно-абразивному обробленні (ВіМАО) надтвердої кераміки і сприятиме отриманню високої якості обробленої поверхні.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вібро-магнітно-абразивне оброблення – це новий вид оброблення, тому саме цьому виду майже не приділено уваги, але магнітно-абразивний інструмент застосовується й при обробці іншими видами оброблення.

Формуванням та впливом магнітно-абразивного інструменту на якість оброблення займалися значна кількість спеціалістів та вчених, серед яких, насамперед, В.С. Майборода, в роботах якого приділена увага магнітно-абразивній обробці лопаток на установці типу кільцева ванна, дослідженню умов магнітно-абразивного оброблення при кільцевому положенні магнітних зазорів, магнітно-абразивному обробленню кільцевого різального інструменту в умовах великих магнітних щільностей з використанням відновлювальних елементів, дослідженню закономірностей руху фероабразивного порошку при магнітно-абразивній обробці [1].

Ю.М. Барон займався технологією абразивної обробки в магнітному полі, дав характеристику поверхневого слою загартованої інструментальної сталі Р6М5, яка була оброблена магнітно-абразивним поліруванням і магнітною обробкою; вивчав проблеми тертя магнітно-абразивних порошків [2].

Роботи І.І. Білик присвячені отриманню магнітно-абразивних порошків з нерівномірним розподіленням абразивної складової. Роботи Д.Ю. Джулій, І.В. Ткачук, В.М. Гейчук присвячені визначенню впливу форми магнітно-абразивних зерен на їх різальну здатність, методиці оцінки абразивної здатності порошкових магнітно-абразивних матеріалів, формуванню магнітно-абразивного інструменту при магнітно-абразивному обробленні. Але, на жаль, проблема не була розкрита на сто відсотків.

Мета статті – розкрити роль феромагнітної складової вібро-магнітно-абразивного різального інструменту для покращення якості поверхні, що обробляється.

Виклад основного матеріалу досліджень. Вихідна магнітно-абразивна суміш при увімкненому магнітному полі установки утримується магнітними силами, обумовленими величиною магнітного поля в робочому просторі. Зразки різальних пластин із полікристалічного нітриду бору (ПКНБ) при накладанні вібрацій орієнтуються в просторі робочої зони за принципом найменшого опору переміщенню та при здійсненні поступальних рухів проходять через ущільнений магнітно-абразивний шар, здійснюючи обробку поверхонь. Незв'язані між собою зерна порошку переміщуються усередині робочої камери.

Відповідно до функціонального призначення магнітне поле формує з порошкової феромагнітної абразивної маси різальний інструмент з керованою жорсткістю. Кожна поверхня зразків із ПКНБ, що оброблюються, знаходиться у контакті із магнітно-абразивним шаром.

Як ріжучий інструмент при вібро-магнітно-абразивній обробці неможливо використання тільки традиційних абразивних матеріалів, так як вони повинні володіти не тільки абразивними, а й високими магнітними властивостями.

Основною властивістю магнітно-абразивних порошків є міцність з'єднання феромагнітної і абразивної складових. Останнє істотно впливає на стійкість зерен порошку при впливі термічних і механічних навантажень. Важливе значення має також мікротвердість, форма части-

нок, технологічність у виготовленні і вартість магнітно-абразивного порошку. Таким чином, в якості ріжучих елементів при ВіМАО використовуються порошки феросплавів, заліза, керметів та інших речовин, які вибираються залежно від матеріалу оброблюваних виробів, стану його поверхні і вихідної шорсткості.

Порція магнітно-абразивного порошку при увімкненому магнітному полі утримується магнітними силами, обумовленими величиною магнітного поля в робочому просторі. Зразки виявляються притиснутими до абразивного матеріалу, та при русі заготовки вгору чи вниз здійснюється обробка надтвердої кераміки. При цьому видаляється припуск і формується поверхня з новим мікрорельєфом. Сили тертя між зернами допомагають магнітному полю утримувати порошок усередині робочого зазору [1].

Кожна поверхня зразку, що оброблюється, знаходиться у контакті з зерном. На поверхню діють сила різання P_z (якщо зерно упровалося в поверхню і здійснює мікрорізання або притирається до поверхні зразка) та сила тертя. Ці сили прагнуть захопити контактуюче зерно разом із заготовкою, що рухається, і повернути його щодо власного центру інерції. Руху зерен разом із поверхнею заготовки і їх поворотам перешкоджають оточуючі зерна, які під дією сил магнітного поля ущільнюються і створюють стовпчики з феромагнітного порошку.

Якщо при поступовому поглибленні ріжучого зерна в поверхню, що оброблюється, сила різання перевищить опір повороту зерна з боку середовища, що його оточує, або якщо на шляху зерна, що третрється (різального), з'являється перешкода у вигляді збільшеної мікронерівності, твердого чужорідного включення, то таке зерно повертається і в контакт із заготовкою вступають його нові ділянки і нові ріжучі кромки. Саме цими поворотами можна пояснити переривчастий характер рисок – слідів абразивного різання на поверхні заготовки.

Відмітною особливістю абразивного різання при ВіМАО є спостережувані різкі зміни продуктивності процесу при зміні умов обробки. Своєрідний ріжучий інструмент, сформований магнітним полем із магнітно-абразивного порошку, відрізняється підвищеною еластичністю. Глибина впровадження кожного зерна в поверхню, що оброблюється, (а, значить, і об'єм матеріалу, що зрізується ним) є результатом сталості у кожному окремому випадку рівноваги між силами, що притискають зерно до оброблюваної поверхні, і силами опору матеріалу заготовки введенню зерна.

Для того, щоб визначитися з величиною зерна, при обробці були проведені декілька спостережень, метою яких було визначення ступеня залежності продуктивності обробки від величини зерна абразиву (рис. 1).

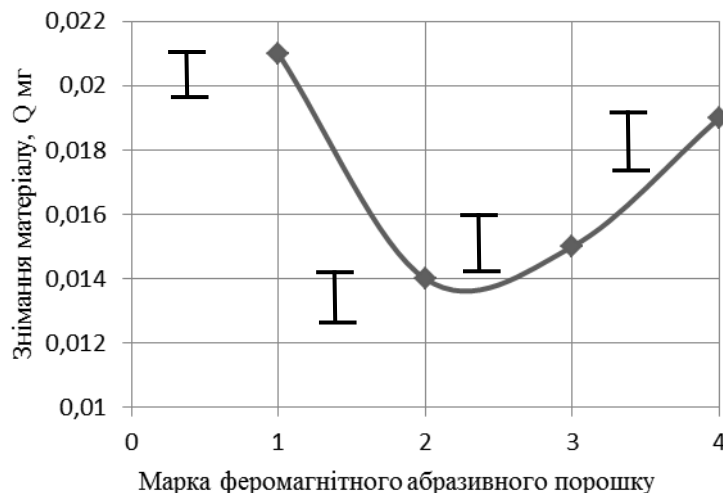


Рис. 1 – Залежність продуктивності обробки від дисперсності порошку ФЕРОМАП: 1 – ФЕРОМАП 630/400 мкм; 2 – ФЕРОМАП 400/315 мкм; 3 – ФЕРОМАП 315/200 мкм; 4 – ФЕРОМАП 200/100 мкм

Як показали попередні дослідження, при обробці таким порошком, як ФЕРОМАП 630/400 мкм, ФЕРОМАП 400/315 мкм, ФЕРОМАП 315/200 мкм, ФЕРОМАП 200/100 мкм, була

отримана краща якість поверхні, ніж від застосування порошків типу ДЧК 630/400 мкм, ДЧК 630/400 мкм та порошків округлої форми, таких як: ПОЛІМАМ-М 400/315 мкм та ПР Р6М5 300/250 мкм. Тим більше, що всі ці порошки мають не дуже високі різальні властивості. Тому для досліджень було прийнято саме порошки типу ФЕРОМАП різної дисперсності.

Як показали експерименти, найкраще зарекомендував себе ФЕРОМАП 630/400 мкм, але використання вібраційної сили майже знівелювало розбіжності. Це сталося тому, що без використання вібрації основну роль відігравала величина зерна, але саме вібраційна складова стала вирішальною при виборі більш продуктивного та більш дешевого матеріалу. Саме тому ФЕРОМАП 200/100 мкм був прийнятий за основний різальний матеріал.

Під час вібро-магнітно-абразивного оброблення при дії на електропровідні порошки полюсів магнітного індуктора і при переміщеннях зразків усередині робочого простору відносно стовпчиків абразиву, в них можуть індуктуватися електричні струми. Причинами появи індукційних струмів можуть служити також періодичні зміни щільності магнітного потоку в робочому просторі, якщо індуктор створює магнітне поле [2].

Індукційні струми заготовки впливають на величину і розподіл магнітного поля в робочому зазорі, оскільки вони завжди направлені так, щоб своїм власним магнітним полем перешкоджати зміні зовнішнього магнітного поля, що їх породжує.

Відповідно до функціонального призначення магнітного поля, у кожному конкретному випадку усі відомі схеми магнітно-абразивного оброблення можуть бути розділені на п'ять груп, одна з яких має наступний зміст – магнітне поле формує з порошкової феромагнітної абразивної маси різальний інструмент з керованою жорсткістю і створює сили різання. Інші схеми не підходять за функціональним призначенням при ВіМАО.

Процес вібро-магнітно-абразивної обробки – це той процес, в якому видалення матеріалу розпочинається одночасно з вмиканням вібрації та створенням магнітного поля в зоні обробки. Визначення сил, що діють під час ВіМАО, важливе для розуміння механізму видалення матеріалу, бо сили безпосередньо впливають на формування готової поверхні.

Якість поверхні визначалася на безконтактному інтерференційному 3D-профілографі «Micron-alpha».

Якість поверхні ріжучої кромки формується на фінішних операціях, однак попередня обробка і заготівельний процес теж впливають на якість поверхні внаслідок технологічного успадкування вихідних властивостей заготовки на всіх етапах її обробки.

Шорсткість поверхні визначається прийнятим методом обробки, який характеризує розмір, форму шорсткості, напрямок штрихів обробки. Режими різання впливають на утворення шорсткості поверхні [3].

Розглядаючи приклади поверхонь зразків з надтвердої кераміки, можна зробити висновок про те, що після обробки ДЧК 630/400 мкм поверхня має хаотично розташовані риски і великі подряпини. Після обробки цього ж зразка ПОЛІМАМ-М 400/315 мкм кількість подряпин різко зменшилася, і вони придбали менш хаотичний характер. Це говорить про те, що певна обробка надтвердої кераміки відбулася, але домогтися потрібної шорсткості поверхні не вдалося.

На рисунку 2 представлені фрагменти поверхонь, які пройшли обробку ВіМАО.

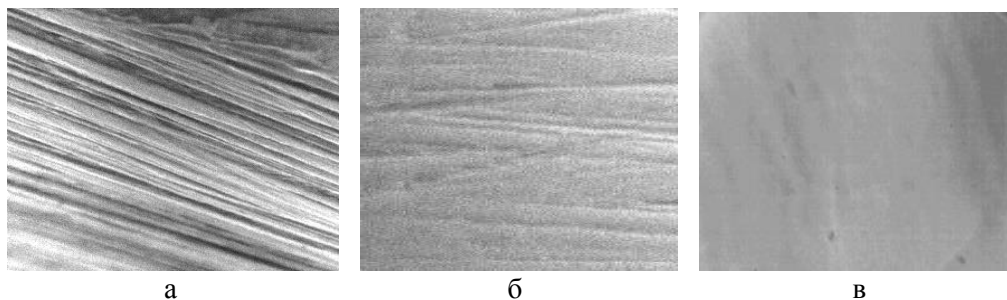


Рис. 2 – Поверхні зразків з надтвердої кераміки, що пройшли обробку ВіМАО з використанням різних феромагнітних абразивних матеріалів ($\times 500$): а – обробка ДЧК 630/400 мкм; б – обробка ПОЛІМАМ-М 400/315 мкм; в – обробка ФЕРОМАП 200/100 мкм

Таким чином при обробці ДЧК 630/400 мкм (рис. 2, а) відбулися зміни мікрорельєфу поверхні в кращу сторону, мікрорельєф при обробці ПОЛІМАМ-М 400/315 мкм (рис. 2, б) став якіснішим, а при обробці ФЕРОМАП 200/100 мкм (рис. 2, в) поверхня придбала квазіоднорідний характер, що є показником високої якості обробки поверхні.

Оцінюючи профілограми, робимо висновок за наведеними даними, що обробка ФЕРОМАП 200/100 мкм (рис. 3, в) привела до того, що шорсткість поліпшилась в середньому до 0,11 мкм. Такі показники говорять про те, що якість при обробці саме ФЕРОМАП 200/100 мкм значно підвищилася в порівнянні з іншими феромагнітними матеріалами.

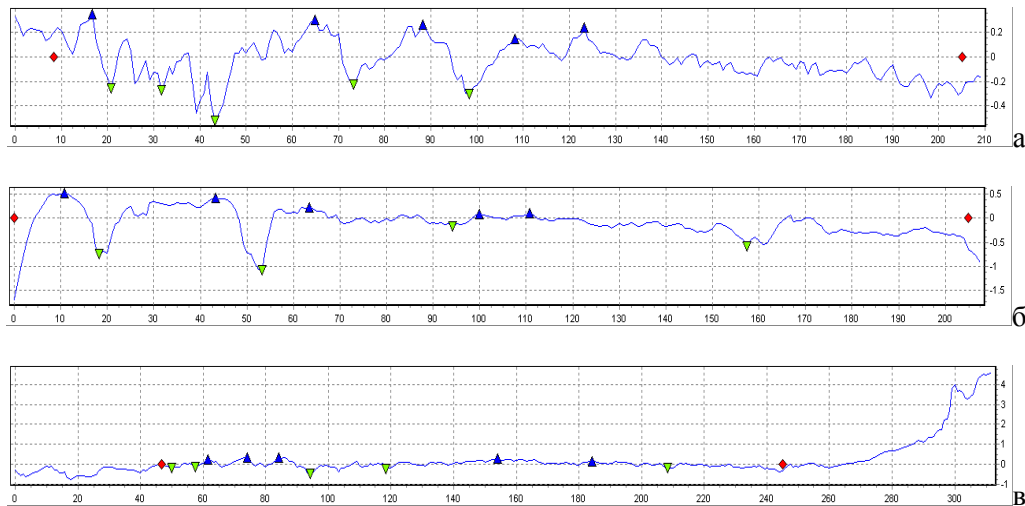


Рис. 3 – Профілограми поверхні надтвердої кераміки: Ind.results Sample a, Angle 0 Ra(1)=0.44 Ra при допуску (Lim=5.1) обробка ДЧК 630/400 мкм; Sample б, Angle 36 Ra(2)=0.22 при допуску (Lim=5.1) обробка ПОЛІМАМ-М 400/315 мкм; Sample в, Angle 108 Ra(3)=0.11 Ra при допуску (Lim=5.1) обробка ФЕРОМАП 200/100 мкм

Для використання в якості магнітно-абразивного інструменту (МАІ) можна рекомендувати абразивні частки тільки зі сфероїдальною формою зерна для забезпечення підвищеної поліруючої і зміцнюючої здатності за рахунок притирання оброблюваної поверхні, що у меншій мірі буде реалізуватися при використанні абразивних порошоків з іншою формою часток, які виконують переважно мікрорізання і диспергування матеріалу з поверхні заготовки.

Висновки

1. Встановлено, що ВіМАО забезпечує високопродуктивну і якісну обробку деталей, коли відбувається оброблення абразивним матеріалом ФЕРОМАП 200/100 мкм.
2. Профілограми поверхні надтвердої кераміки показують, що рельєф поверхонь після обробки ФЕРОМАП 200/100 мкм квазіоднорідний.
3. Встановлено можливість різання найбільш гострою кромкою зерна магнітно-абразивного порошку. Мікрочастки магнітного інструменту повинні бути тільки сфероїдальної форми.

Перелік використаних джерел:

1. Майборода В.С. Дослідження властивостей магнітно абразивного інструменту, сформованого із сумішей порошоків / В.С. Майборода // Процеси механічної обробки в машинобудуванні : Зб. наук. пр. / ЖДТУ. – Житомир, 2009. – Вип. 6. – С. 144-159.
2. Барон Ю.М. Магнитно-абразивная и магнитная обработка изделий и режущих инструментов / Барон Ю.М. – Л. : Машиностроение, 1986. – 176 с.
3. Формування магнітно-абразивного інструменту при магнітно-абразивному обробленні довгомірних деталей у кільцевій робочій зоні / Д.Ю. Джулій, В.С. Майборода, І.В. Ткачук, В.М. Гейчук // Процеси механічної обробки в машинобудуванні : Зб. наук. пр. / ЖДТУ. – Житомир. – 2011. – Вип. 11. – С. 92-107.

References:

1. Mayboroda V.S. Doslidzhennya vlastivostey mahnitno abrazyvnoho instrumentu sformovanomu z sumishey poroshkiv [Prescription of the power of magnetically abrasive tool molded from the sum of powders]. *Protsey mekhanichnoyi obrobky v mashynobuduvanni – Machining processes in mechanical engineering*, 2009, vol. 6, pp. 144-159. (Ukr.)
2. Baron Yu.M. Mahnitno-abrazyvna i mahnitna obrobka vyrobiv i rzhuchykh instrumentiv [Magnetic-abrasive and magnetic processing of products and cutting tools]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1986. 176 p. (Rus.)
3. Dzhuliy D.Yu., Mayboroda V.S., Tkachuk I.V., Heychuk V.M. Formuvannya mahnitno-abrazyvnoho instrumentu pry mahnitno-abrazyvnomu obroblenni dovhomirnykh detaley u kil'tsevyi robochiy zone [Formation of a magnetic-abrasive tool during magnetic-abrasive grinding of all-over parts near the cyclone working zone]. *Protsey mekhanichnoyi obrobky v mashynobuduvanni – Machining processes in mechanical engineering*, 2011, vol. 11, pp. 92-107. (Ukr.)

Рецензент: А.А. Андилахай
д-р техн. наук, проф., ДВНЗ «ПДТУ»

Стаття надійшла 15.04.2021

МЕТАЛУРГІЯ

УДК 622.341.23

doi: 10.31498/2225-6733.42.2021.240571

© Кривенко В.В.¹, Лялюк В.П.², Чупринов Є.В.³,
Трус І.М.⁴, Овчарук А.М.⁵**ОЦІНКА МЕТАЛУРГІЙНОЇ ЦІННОСТІ МАРГАНЦЕВОЇ СИРОВИНИ**

Виконано комплексні дослідження фізико-хімічних властивостей і металургійної цінності марганцевої сировини різних родовищ, що використовуються при виробництві феросплавів в рудовідновних печах підвищеної потужності. Розглянуто питання повернення у виробництво продуктів збагачення сировини і відходів феросплавного виробництва, використання яких в металургійному переділі без підготовки і огрудування неможливо. Зіставлені вимоги до показників якості марганцевих руд і концентратів за нормативними документами різних країн. Досліджено металургійні властивості і кінетичні закономірності відновлення зразків марганцевої сировини різних родовищ.

Ключові слова: марганцевий концентрат, феросплави, дисоціація, відновлення, цінність сировини.

V.V. Krivenko, V.P. Lyalyuk, E.V. Chuprinov, I.M. Trus, A.M. Ovcharuk. Evaluation of metallurgical value of manganese raw materials. Samples of manganese ores of various chemical and fractional compositions, which are widely used nowadays in the production of manganese ferroalloys at domestic enterprises have been investigated. These include samples of manganese ores from the deposits in Georgia, Brazil, Australia and Ghana. Comprehensive studies of the physical and chemical properties and metallurgical value of manganese raw materials from various deposits, used in the production of ferroalloys in ore-reducing furnaces of uprated power, have been carried out. Return to production of concentrate products of raw materials and wastes of ferroalloy production, the use of which in metallurgical processing without preparation and agglomeration is impossible, have been considered. The results of comparative analytical studies of domestic and foreign manganese ore raw materials are presented. The requirements for quality indicators of manganese ores and concentrates according to the regulatory documents of different countries have been compared. Metallurgical properties and kinetic regularities of recovery of the samples of manganese raw materials from various deposits have been investigated. The optimal share of the use of imported raw materials in the charge mixture for the production of manganese ferroalloys in relation to the required phosphorus content in them has been estimated. In accordance with the standard methods in generator gas atmosphere, studies have been carried out to determine the reducibility and temperature of the onset of manganese ores softening. The recoverability has been determined by the weight loss of the sample by the gravimetric method and controlled by chemical analysis.

¹ канд. техн. наук, доцент, Навчально-науковий технологічний інститут Державного університету економіки і технологій, м. Кривий Ріг

² д-р техн. наук, професор, Навчально-науковий технологічний інститут Державного університету економіки і технологій, м. Кривий Ріг, ORCID: 0000-0001-7258-2079, vitalij.lyalyuk@gmail.com

³ канд. техн. наук, доцент, Навчально-науковий технологічний інститут Державного університету економіки і технологій, м. Кривий Ріг, ORCID: 0000-0001-8605-3434, itchupa@gmail.com

⁴ канд. техн. наук, доцент, НТУУ «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», м. Київ, ORCID: 0000-0001-6368-6933, inna.trus.m@gmail.com

⁵ д-р техн. наук, професор, Національна металургійна академія України, м. Дніпро

Keywords: *manganese concentrate, ferroalloys, dissociation, reduction, value of raw materials.*

Постановка проблеми. Вибір раціональної технології переробки і техніко-економічні показники виробництва марганцевих феросплавів в значній мірі визначаються якістю марганцеворудної сировини: хімічним, мінералогічним і гранулометричним складами, фізичними властивостями. Родовища марганцевих руд на земній кулі розподілені вкрай нерівномірно, настільки ж нерівномірний їх речовинний склад, що пов'язано з генезисом руд [1]. Велика частина світових розвіданих запасів марганцевих руд (понад 80%) зосереджена в Південно-Африканській республіці (ПАР), яка є найбільшим їх виробником і експортером. В Україні балансові запаси становлять близько 2 млрд. тонн, при цьому більше 70% вітчизняних марганцевих руд важкозбагачувані та відносяться до карбонатних і окисно-карбонатних різновидів. Відмінною особливістю марганцевих руд вітчизняних родовищ є відносно невисокий вміст марганцю і підвищена концентрація фосфору і кремнезему [2], що не дозволяє, на відміну від більшості зарубіжних руд, використовувати сировину без попереднього збагачення і огрудування.

Труднощі з виробництвом конкурентоспроможних марганцевих сплавів на вітчизняній сировині особливо загострилися в останні роки, коли, з одного боку, вітчизняні підприємства почали нарощувати випуск низькофосфористих марок силікомарганцю і феромарганцю, а, з іншого боку, підвищення вартості енергетичних ресурсів зробило неконкурентоспроможною технологію пірометалургійної технології дефосфорації сировини, котра діяла раніше. Це вимагало використання імпортих марганцевих руд на українських феросплавних заводах.

Таким чином, проблема комплексних досліджень фізико-хімічних властивостей і металургійної цінності зарубіжної марганцевої сировини стала вкрай актуальною для українських металургів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вивченню відновлюваності марганцевих мінералів, руд і концентратів присвячена велика кількість робіт [3-5], при цьому робота [5] присвячена вивченню саме бразильських, африканських і австралійських руд. Однак наявні в літературі дані часто неоднозначні. Відомо, що MnO_2 і $MnCO_3$ дисоціюють при порівняно низьких температурах – 510 і 176°C відповідно.

У роботах [6, 7] розглянуті питання мінералогічного дослідження марганцевих руд осадового генезису, вивчені питання мінералогії та фізико-хімічних властивостей марганцевого компонента залізо-марганцевих конкрецій, а також розроблена методика термохімічного визначення манганіту в марганцевих рудах і дана рекомендація щодо поліпшення якості окисних марганцевих руд Нікопольського басейну. У статті [8] виконано дослідження сучасних тенденцій розвитку марганцевидобувної промисловості світу і України, запропоновано шляхи підвищення конкурентоспроможності вітчизняних підприємств з видобутку марганцевої руди в залежності від сучасної кон'юнктури ринку. Автором роботи [9] зроблено важливий висновок, що джерелами відносно якісних руд на марганець та супутні компоненти є техногенні родовища (шламосховища), розробка котрих може бути одним з найперспективніших напрямків, що також дозволить вирішити актуальні екологічні проблеми. В роботі [10] наведена характеристика мінеральних складових окисних і карбонатних марганцевих руд. Визначено, що характер перетворень при термічній обробці (агломерація, випал окатишів і брикетів, попереднє нагрівання) багато в чому визначається хімічним, мінералогічним і гранулометричним складами, а також іншими властивостями вихідної рудної сировини.

Мета статті – фізико-хімічний аналіз властивостей марганцевої сировини.

Виклад основного матеріалу. Для адекватності оцінки сировини необхідно зіставити показники якості марганцевих концентратів, вироблених в Україні та за кордоном (табл. 1). Були досліджені проби марганцевих руд різного хімічного і фракційного складів (табл. 2-4), які в даний час широко використовуються при виробництві марганцевих феросплавів на вітчизняних підприємствах. До них відносяться проби марганцевих руд родовищ Грузії, Бразилії та Гани [11].

Аналізуючи результати досліджень фізичних властивостей марганцевих руд, наведених в табл. 3, слід зазначити, що руди мають незначну пористість, крім руди з Грузії, і більш високу дійсну густину в порівнянні з вітчизняними марганцевими концентратами. Механічна міцність (по фракції більше 5 мм) кускових марганцевих руд невисока і поступається в міцності марган-

цевому агломерату, виготовленому з вітчизняних концентратів. Для офлюсованих та неофлюсованих марганцевих агломератів вітчизняного виробництва механічна міцність складає 76-80%, а пористість – 8-22%.

Дослідження по визначенню відновлюваності і температури початку розм'якшення марганцевих руд виконували за стандартними методиками по ДСТУ-3202-95 в атмосфері генераторного газу. Відновлюваність визначали по втраті зразком маси ваговим способом і контролювали хімічним аналізом.

Таблиця 1

Технічні вимоги, що пред'являються до якості марганцевих руд і концентратів для виплавки феросплавів

Компонент	Масова частка, %							
	Для феромарганцю*				Для силікомарганцю*			
	Україна I сорт	Західна Європа		США сорт «А»	Україна II сорт	Західна Європа		США сорт «Б»
		I сорт	II сорт			I сорт	II сорт	
Mn, не менше	43,0	48,0	46,0	46,0	34,0	44,0	40,0	40,0
Fe, не більше	-	-	7,5	8,0	-	9,0	12,0	16,0
SiO ₂ , не більше	-	7,0	9,0	12,0	-	10,0	12,0	15,0
P, не більше	-	0,12	0,15	0,18	-	0,15	0,15	0,30

*вказані вимоги до нікопольських окисних концентратів і концентратів та руд зарубіжних виробників.

Таблиця 2

Хімічний склад досліджених зразків марганцевих руд

№	Країна-виробник	Масова частка компонентів, %									
		Mn	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	P ₂ O ₅	Na ₂ O	K ₂ O	в.п.п.
1	Грузія	47,20	12,09	1,88	1,92	0,75	1,86	0,47	0,21	0,59	3,29
2	Бразилія	47,60	9,30	1,20	1,03	1,34	9,30	0,14	0,23	1,15	2,29
3	Австралія	47,00	13,05	1,63	2,67	0,98	8,94	0,07	0,12	0,03	3,88
4	Гана-I	30,00	14,05	2,65	4,65	5,08	1,72	0,16	0,28	0,24	31,6
5	Гана-II	39,79	19,30	4,20	0,40	0,12	7,10	0,32	0,19	0,63	5,02
6	Гана-III	30,50	13,52	2,20	4,81	4,85	1,05	0,25	0,24	0,21	32,6

Таблиця 3

Результати досліджень загальних фізичних властивостей марганцевих руд

№	Країна-виробник	Масова частка вологи, %	Густина, кг/м ³			Пористість загальна, %	Міцність (ДСТУ 3200-95) на удар по фракції більше 5 мм, %
			насіпна	уявна	істинна		
1	Грузія	4,0	1740	2400	3880	38,14	31,0
2	Бразилія	8,4	2940	4210	4270	10,92	58,0
3	Австралія	2,8	2110	3850	4020	4,23	75,6
4	Гана-I*	1,6	2300	3240	3270	1,4	71,0
5	Гана-II	7,2	2090	-	3670	-	-
6	Гана-III	1,6	2120	3190	3370	5,3	72,0

*марганцева руда Гана I і III – карбонатна, Гана II – окисна.

Відновлення оксидів і карбонатів марганцю в досліджуваних рудах протікає при більш низьких температурах, ніж їх дисоціація. Криві зміни маси проби в залежності від температури, зображені на рис. 1, наочно підтверджують цей висновок. На швидкість і ступінь відновлення марганцевої сировини істотний вплив здійснюють температура, вид і концентрація відновника, крупність, пористість, фазовий і мінеральний склад. Досліджувані проби марганцевої сировини при

одній і тій же температурі і інших рівних умовах втрачають масу за рахунок дегідратації, декарбонізації і дисоціації марганцевих мінералів з різною швидкістю. Характерною особливістю при відновленні марганцевих руд є поява рідкої фази при порівняно низькій температурі 750-800°C.

Таблиця 4

Мінералогічний склад досліджених зразків марганцевих руд

№	Країна-виробник	Розподіл марганцю по мінеральним фазам,%											
		Рудна фаза		Піролюзит		Мінерали групи псиломелан		Брауніт		Манганіт		Карбонати марганцю (родохрозит, кальцієвий родохрозит)	
		Mn	M	Mn	M	Mn	M	Mn	M	Mn	M	Mn	M
1	Грузія	47,20	76,4	43,7	69,1	-	-	-	-	3,2	6,1	0,3	1,2
2	Бразилія	47,60	78,6	16,3	25,8	14,6	25,3	16,7	27,5	-	-	-	-
3	Австралія	47,00	77,2	2,5	3,9	3,2	5,4	40,5	66,0	-	-	0,8	1,9
4	Гана-I	30,00	78,5	1,1	1,7	-	-	1,2	1,9	-	-	27,7	74,9
5	Гана-II	39,7	66,2	18,3	29,0	17,0	29,4	3,8	6,0	-	-	0,6	1,8
6	Гана-III	30,5	77,8	-	-	-	-	-	-	-	-	30,5	77,8

M – кількість марганцевого мінералу в рудній частині проби, %.

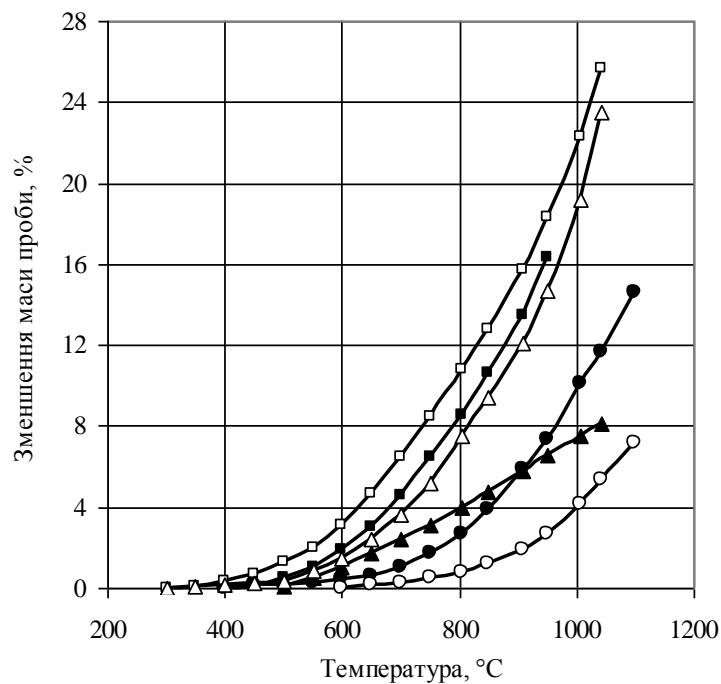


Рис. 1 – Кінетика зміни маси проби в реакційній зоні при нагріванні у відновному середовищі: ● – Грузія; ○ – Бразилія; ■ – Австралія; □ – Гана-I; ▲ – Гана-II; △ – Гана-III

На рис. 2 представлені результати досліджень з визначення газопроникності та зменшення висоти проби та температури початку розм'якшення марганцевих руд при нагріванні у відновному середовищі згідно ДСТУ-3205-95.

Температурою початку розм'якшення вважається температура, при якій зменшення лінійних розмірів випробовуваних проб становить понад 10% під дією на них постійного механічного навантаження. Таким чином, найкращими рудами з точки зору їх використання для виплавки марганцевих феросплавів вважаються ті, у яких зменшення висоти проби на 10% відбувається пізніше. З рис. 2 видно, що такими рудами є бразильські та австралійські.

Дослідженнями встановлено, що спочатку рідка фаза спостерігається в окремих мікро-

об'ємних частинках по периферії мінералів, особливо на зернах польового $K, Na[AlSi_2O_8]$ і кварцу (SiO_2), що межують з манганозитом (MnO). З підвищенням температури понад $800^\circ C$ кількість рідкого розплаву збільшується, і силікатний розплав може насичувати значну частину рудної маси. Низька температура початку появи рідкої фази пояснюється вмістом в різних кількостях у вихідному марганцевмісному матеріалі оксидів калію, натрію, кальцію, кремнію та інших елементів, які разом з високоактивним манганозитом утворюють складну за хімічним складом легкоплавку систему. Локальний рентгеноспектральний аналіз ділянки оплавлення фіксує підвищений вміст K, Na, Ca і Si .

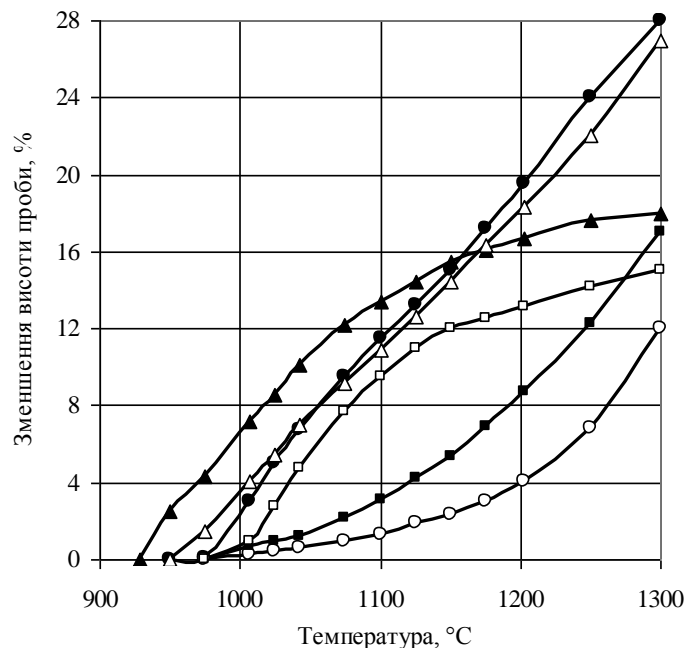


Рис. 2 – Зміна висоти проби в реакційній зоні при нагріванні у відновному середовищі: ● – Грузія; ○ – Бразилія; ■ – Австралія; □ – Гана-I; ▲ – Гана-II; △ – Гана-III

Для технологічних процесів виробництва марганцевих феросплавів сприятливими є марганцеві руди і концентрати, що характеризуються підвищеною температурою розм'якшення, що сприяє більш глибокому відновленню марганцю на початковому етапі процесу відновлення, коли шихта знаходиться в твердофазному стані. Однак, деякі з цих руд вимагають великих енергетичних витрат і відносяться до важковідновних, з огляду на практично повне зв'язування оксиду марганцю в тейфроті ($MnSiO_4$), родоніті ($MnSiO_3$), яkobсиді ($MnFe_3O_4$) та інших термодинамічно стійких з'єднаннях. До того ж, деякі з них, і особливо яkobсид, мають знижений електроопір.

Труднощі залучення карбонатної марганцевої руди в металургійний переділ зумовлюються високим теплоспоживанням карбонатної сировини на розкладання карбонатів. Для цього необхідно витратити електроенергію в кількості близько 240 кВт·год/т матеріалу. У процесі розкладання вуглекислих солей кальцію і марганцю виділяється значна кількість вуглекислого газу, що призводить до підвищення витрат вуглецевого відновника і електроенергії на реалізацію реакції $CO_2 + C = 2CO - 42,45$ кВт·год. В процесі високошвидкісного нагрівання шматків карбонатної руди має місце їх руйнування з утворенням 20-30% дріб'язку (фракції менше 5 мм), що призводить до зменшення газопроникності шихти і, в результаті, до порушення технологічного режиму плавки [3].

Разом з тим, карбонатна сировина має природну основність 0,6-0,7, що частково виключає добавку в шихту вапняку, а температура плавлення карбонатних руд і концентратів приблизно на $100-200^\circ C$ вище, ніж окисних, що покращує термодинамічні і кінетичні умови протікання процесів відновлення [12].

Результати безфлюсової плавки феромарганцю з вмістом фосфору 0,35% за прийнятою на ПАТ «НЗФ» схемою з використанням шлаку малофосфористого передільного (ШМП) добре

узгоджуються з кількісною оцінкою впливу шлаку на основні показники виробництва. Так витрата електроенергії склала 4054 кВт·год/т, а вилучення марганцю – 82,2% (з урахуванням відходів виробництва). Використання в шихті імпоротної руди для отримання аналогічного за якістю сплаву позбавила змоги досягти помітних переваг по вилученню марганцю, а витрата електроенергії навіть збільшилася. Ймовірно, це пов'язано не стільки з якістю сировини, скільки зі зміною електричних параметрів плавки, викликаних підвищеною витратою відновника. Якщо врахувати витрати електроенергії при агломерації (~ 150 кВт·год/т) і виплавці ШМП (850-900 кВт·год/т), то сумарна витрата перевищує 5000 кВт·год/т.

Більш наочно порівняння металургійної цінності різних видів сировини можна провести на прикладі виплавки силікомарганцю з фосфором 0,15-0,25%. Так як для виплавки сплаву такої якості може бути використана сировина з фосфорним модулем (P/Mn) не вище 0,002. Виплавку сплаву здійснюють за двома варіантами: за першим – з використанням в шихті понад 80% малофосфористого шлаку, по другому – на високоякісній австралійській руді.

При використанні зазначеної кількості ШМП наочно проявляється його негативний вплив на виробничі показники. Так, зі зниженням фосфору в сплаві з 0,25 до 0,15% (відповідне зростання частки ШМП в шихті з 82 до 93%) вилучення марганцю знижується з 72 до 60%, а питома витрата електроенергії зростає на 6-7%. Застосування австралійської руди дозволяє помітно підвищити вилучення марганцю (\approx до 82%) і знизити витрату електроенергії на 200-250 кВт·год/т.

Наведені результати показують, що при використанні вітчизняної сировини для виробництва силікомарганцю з фосфором не більше 0,35% кількість малофосфористого шлаку в шихті для досягнення відносно прийнятних показників не повинно перевищувати 900-950 кг/т сплаву. Збільшення частки ШМП при виплавці металу з фосфором 0,15-0,25% призводить до різкого зниження всіх показників процесу. В цьому випадку безумовну перевагу мають високоякісні імпортні руди з фосфорним модулем не вище 0,002.

Висновки

Зіставлені показники якості марганцевих концентратів, вироблених в Україні та за кордоном, досліджені проби марганцевих руд різного хімічного і фракційного складів, які в даний час широко використовуються при виробництві марганцевих феросплавів на вітчизняних підприємствах. Аналіз фізичних властивостей марганцевих руд показав, що механічна міцність (по фракції більше 5 мм) кускових марганцевих руд невисока і поступається в міцності марганцевому агломерату, зробленому з вітчизняних концентратів.

Проведені дослідження з визначення відновлюваності і температури початку розм'якшення марганцевих руд. Основною відмінною особливістю досліджуваної марганцевої сировини зарубіжних виробників є низький модуль фосфору P/Mn < 0,0035 і кремнезему SiO₂/Mn від – 0,5 і нижче, що дозволяє досягати високих техніко-економічних показників виробництва марганцевих феросплавів.

Порівняльним аналізом металургійної цінності вітчизняної та імпоротної сировини встановлено, що при виробництві силікомарганцю, в зв'язку з низькою температурою плавлення ШМП, його частка в шихті не повинна перевищувати 40-45% (сплав з P до 0,35%). Для отримання сплаву з фосфором від 0,15 до 0,20% доцільно використовувати імпортну руду з підшивкою ШМП.

Перелік використаних джерел:

1. Ферросплавы Украины – 2000 / М.И. Гасик, О.Г. Ганцеровский, А.Н. Овчарук, И.П. Рогачев. – Днепропетровск : ГНПП «Системные технологии», 2001. – 143 с.
2. Гасик М.И. Физикохимия и технология электроферросплавов : учебник для ВУЗов / М.И. Гасик, Н.П. Лякишев. – Днепропетровск : ГНПП «Системные технологи», 2005. – 448 с.
3. Кучер А.Г. Исследование физико-химических превращений в карбонатных марганцевых концентратах при их термической обработке / А.Г. Кучер // Актуальные проблемы и перспективы электрометаллургического производства. – Днепропетровск : ГНПП «Системные технологии», 1999. – С. 48-54.
4. Кривенко В.В. Исследование влияния механического и теплового воздействия на марганцевые концентраты и агломераты в окислительных и восстановительных условиях / В.В. Кри-

- венко, А.Н. Овчарук // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2002. – № 2. – С. 21-23.
5. Sorensen B. Properties of manganese ores and their change in the process of calcinations / V. Sorensen, S. Gaal, M. Tangstad // *Proceeding of The Twelfth International Ferroalloys Congress*. – Vol. 2. – Helsinki, Finland, 2010. – Pp. 439-448. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2010.01.001>.
 6. Базилевская Е.С. Химико-минералогическое исследование марганцевых руд (Никопольский бассейн и конкреции Тихого океана) / Е.С. Базилевская // *Труды ГИН АН СССР*. – М. : Наука, 1976. – Вып. 287. – 95 с.
 7. Грищенко С.Г. О взаимосвязи химико-минералогического состава и восстановимости марганцеворудных материалов различных месторождений. Сообщение I. Особенности генезиса и состояния исходных марганцеворудных материалов / С.Г. Грищенко, Т.Ф. Райченко, Н.М. Москалева // *Известия АН СССР, Металлы*. – 1991. – № 3. – С. 13.
 8. Прокопенко В.І. Визначення потенціалу марганцеворудного комплексу України стосовно теперішньої кон'юнктури ринку / В.І. Прокопенко, А.Ю. Череп, Д.П. Пілова // *Збірник наукових праць Національного гірничого університету*. – 2018. – № 55. – С. 62-78.
 9. Антаков Є. Сучасний стан світового та українського ринку марганцю: основні проблеми та тенденції / Є. Антаков // *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*. – 2013. – Вип. 2. – С. 44-48.
 10. Мянновська Я.В. Перетворення мінеральних складових марганцевих руд при температурних умовах формування агломерату / Я.В. Мянновська, Ю.С. Проїдак, Л.В. Камкіна // *Теорія і практика металургії*. – 2019. – № 3. – С. 42-51. – Режим доступу: <https://doi.org/10.34185/tpm.3.2019.07>.
 11. The comprehensive analysis of physical and chemical properties and metallurgical value of foreign manganese raw materials used during ferroalloy production / S.G. Grishenko., V.V. Krivenko, A.N. Ovcharuk, V.I. Olshansky, I.Yu. Filippov // *Proceeding of the fourteenth international ferroalloys congress. Infacon XIV Energy efficiency and environmental friendliness are the future of the global Ferroalloy industry (May 31-June 4, 2015; Kiev)*. – Kiev, 2015. – Volume II – Pp. 436-446.
 12. Гасик М.И. Марганец / М.И. Гасик. – М. : *Металлургия*, 1992. – 608 с.

References:

1. Gasik M.I., Gancerovskij O.G., Ovcharuk A.N., Rogachev I.P. *Ferrosplavy Ukrainy – 2000* [Ferroalloys of Ukraine – 2000]. Dnepropetrovsk, GNPP «Sistemnye tekhnologii» Publ., 2001. 143 p. (Rus.)
2. Gasik M.I., Lyakishev N.P. *Fizikohimiya i tekhnologiya elektroferrosplavov: uchebnik dlya vuzov* [Physicochemistry and Technology of Electroferroalloys: Textbook for Universities]. Dnepropetrovsk, GNPP «Sistemnye tekhnologii», 2005. 448 p. (Rus.)
3. Kucher A.G. Issledovanie fiziko-himicheskikh prevrashchenij v karbonatnyh margancevyh koncentratah pri ih termicheskoy obrabotke [Investigation of physicochemical transformations in carbonate manganese concentrates during their heat treatment]. *Aktual'nye problemy i perspektivy elektrometallurgicheskogo proizvodstva – Current problems and prospects of electrometallurgical production*, Dnepropetrovsk, GNPP «Sistemnye tekhnologii» Publ, 1999, pp. 48-54. (Rus.)
4. Krivenko V.V., Ovcharuk A.N. Issledovanie vliyaniya mekhanicheskogo i teplovogo vozdejstviya na margancevye koncentraty i aglomeraty v okislitel'nyh i vosstanovitel'nyh usloviyah [Investigation of the effect of mechanical and thermal effects on manganese concentrates and agglomerates under oxidizing and reducing conditions]. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost' – Metallurgical and mining industry*, 2002, no. 2, pp. 21-23. (Rus.)
5. Sorensen B., Gaal S., Tangstad M. Properties of manganese ores and their change in the process of calcinations. *Proceeding of The Twelfth International Ferroalloys Congress*, vol. 2, 2010, Helsinki, Finland, pp. 439-448. doi: 10.1016/j.minpro.2010.01.001.
6. Bazilevskaya E.S. Himiko-mineralogicheskoe issledovanie margancevyh rud (Nikopol'skij bassejn i konkretii Tihogo okeana) [Chemical and mineralogical study of manganese ores (Nikopol basin and nodules of the Pacific Ocean)]. *Trudy GIN AN SSSR – Proceedings of the GIN*

- of the USSR Academy of Sciences, 1976, vol. 287, p. 95. (Rus.)
7. Grishchenko S.G., Rajchenko T.F., Moskaleva N.M. O vzaimosvyazi himiko-mineralogicheskogo sostava i vosstanovimosti margancevorudnykh materialov razlichnykh mestorozhdenij. Soobs-?chenie I. Osobennosti genezisa i sostoyaniya iskhodnykh margancevorudnykh materialov [On the relationship between the chemical and mineralogical composition and the reducibility of manganese ore materials from various deposits. Communication I. Features of the genesis and state of the initial manganese ore materials]. *Izvestiia AN SSSR, Metally – Proceedings of the USSR Academy of Sciences, Metals*, 1991, no. 3, pp. 13. (Rus.)
 8. Prokopenko V.I., Cherep A.Yu., Pilova D.P. Vznachennya potencialu margancevorudnogo kompleksu Ukraїni stosovno teperishn'oi kon'yunkturi rinku [Determining the potential of the manganese ore complex of Ukraine in relation to the current market situation]. *Zbirnik naukovikh prats' Natsional'nogo girnichogo universitetu – Collection of Research Papers of the National Mining University*, 2018, no. 55, pp. 62-78. (Ukr.)
 9. Antakov E. Suchasnij stan svitovogo ta ukraїns'kogo rinku margancyu: osnovni problemi ta tendencii [The current state of the world and Ukrainian manganese market: main problems and trends]. *Visnik Kiivs'kogo nacional'nogo universitetu imeni Tarasa Shevchenka. Geologiya. – Visnyk Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 2013, vol. 2, pp. 44-48. (Ukr.)
 10. Myanovs'ka Ya.V., Projdak Yu.S., Kamkina L.V. Peretvorennya mineral'nih skladovih margancevih rud pri temperaturnih umovah formuvannya aglomeratu [Transformation of mineral components of manganese ores under temperature conditions of agglomerate formation]. *Teoriya i praktika metalurgii – Theory and Practice of Metallurgy*, 2019, no. 3, pp. 42-51. doi: 10.34185/tpm.3.2019.07. (Ukr.)
 11. Grishenko S.G., Krivenko V.V., Ovcharuk A.N., Olshansky V.I., Filippov I.Yu. The comprehe - sive analysis of physical and chemical properties and metallurgical value of foreign manganese raw materials used during ferroalloy production. *Proceeding of the fourteenth international ferroalloys congress. Infacon XIV Energy efficiency and environmental friendliness are the future of the global Ferroalloy industry*, Kiev, 2015, vol. II, pp. 436-446.
 12. Gasik M.I. *Marganec* [Manganese]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1992. 608 p. (Rus.)

Рецензент: В.Й. Засельський
д-р техн. наук, проф. ННТІ ДУЕТ

Стаття надійшла 15.04.2021

УДК 621.785.377

doi: 10.31498/2225-6733.42.2021.240573

© Маслов В.О.¹, Пустовалов Ю.П.², Трофімова Л.О.³, Дан Л.О.⁴

ОСОБЛИВОСТІ ІНТЕРКАЛЯЦІЇ МЕТАЛУРГІЙНОГО ГРАФІТУ

Розглянуті особливості інтеркаляції графіту, що був отриманий з залізграфітових відходів металургійного виробництва. Вперше запропонована і обчислена модель розрахунку об'ємної щільності цього графіту. Впроваджено нове поняття «коефіцієнт порушення цілісності графіту K » та формула для його обчислення.

Ключові слова: сполуки інтеркальованого графіту, термографеніт, розширення, об'ємна щільність, коефіцієнт порушення цілісності графіту.

¹ д-р техн. наук, професор, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, maslov_v_o@pstu.edu

² науковий співробітник, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь

³ канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, trofimova.pstu@gmail.com

⁴ канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, trofimova.pstu@gmail.com

V.O. Maslov, Y.P. Pustovalov, L.O. Trofimova, L.O. Dan. Features of metallurgical graphite intercalating. The article considers the distinguishing features of the intercalation of the graphite obtained from the iron-graphite waste of metallurgical production and its subsequent expansion in the falling gravity layer conditions due to shock thermal heating. In doing so, two stages of the process are considered separately: intercalation and thermal expansion. The importance of knowing the distinguishing features of the first stage in terms of ensuring the specified properties of the finished material is emphasized. A new technique and the formula for calculating the theoretical bulk density of intercalated graphite have been proposed depending on the amount and volumes of graphite and intercalate. The assumption has been made and substantiated that the expansion of the graphite particles will occur only in the direction of the «C» axis. Taking into account the fact that the particles will expand 1.45-4.65 times in this direction, it is necessary to amend the calculation formulas of their motion in the falling gravity layer. To obtain reliable results of the calculation, a new concept was introduced – «the graphite integrity breaching coefficient, K» – to calculate the bulk density of intercalated graphite. Based on the experiments, this parameter has been defined in the interval of the volumetric density of intercalated graphite 390-260 kg/m³ with a simultaneous increase in the bulk volume of the layer up to 1.93 m³ of intercalated graphite per 1 m³ of the original graphite. The formula has been derived to calculate this parameter. The final equation has been obtained for calculating the volume density, depending on the initial parameters. As a result of the calculations and the experiments, the numerical values of the breaching coefficient of the graphite integrity have been defined for the values of the volumetric density of intercalated graphite 200-400 kg/m³ – from 3 to 25.

Keywords: *intercalated graphite compounds, thermograpfenite, expansion, bulk density, the breaching coefficient of the graphite integrity.*

Постановка проблеми. Металургійний графіт є відходом металургійного виробництва, який утворюється на всіх ділянках, де відбувається охолодження рідкого чавуну, при переробці чавуну в сталь [1]. Лише на двох ділянках – міксерному і відділенні десульфурації – організовано його уловлювання [2]. У міксерному відділенні виділення графітовмісних відходів пов'язано з великою швидкістю охолодження чавуну при заливці його в міксер, де струмінь чавуну охолоджується за рахунок ефекту барботажу на 40-120°. Це призводить до різкого зниження розчинності вуглецю в чавуні. Це викликає виділення частинок графіту лускатої форми розміром до 0,5-0,8 мм. Системою деаерації ці частинки графіту разом з частинками металевого (оксидного) пилу направляються в систему очищення. Кількість графіту в міксерному пилу досягає 20-40% [3].

У відділенні десульфурації [4] відбувається продування чавуну азотом разом з десульфуруючим агентом. В результаті цього за рахунок інтенсивного охолодження чавуну утворюється залізграфітовий пил десульфурації з вмістом графіту 40-60%. Сумарна кількість такого графітовмісного пилу може досягти 800 т/рік на одному металургійному підприємстві. Тому дуже важливою є проблема його використання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Авторами [5] було запропоновано широке використання залізграфітових відходів для отримання композиційних матеріалів, включаючи і терморозширений графіт (ТРГ, термографеніт).

При отриманні термографеніту важливим є метод термообробки сполук інтеркаляції графіту (СІГ). В роботі [6] описано метод обробки сполук СІГ в стрічковій печі. При цьому для нагріву використовувано інфрачервоні мікрохвильові та лазерні випромінювачі. Однак цей метод не отримав розвитку. Наступним напрямком є використання киплячого шару для процесу термообробки бісульфатного комплексу графіту в псевдозрідженому шарі і в висхідному потоці [7-9]. Ці методи дозволяють час обробки матеріалу в печі з 30-60 хв (щільний шар) зменшити до 1-5 хв (псевдозріджений шар), а у висхідному потоці – до 0,25-0,50 хв. Головним недоліком усіх перелічених способів є охолодження термічно розширеного графіту, що утворився, в газових продуктах спучування. Це сприяє повторній адсорбції сірчаних сполук поверхнею ТРГ. За рахунок цього в ТРГ не вдається знизити вміст сірки нижче 0,3-0,5%, а при необхідності її ви-

далення треба нагрівати ТРГ до 2600°C [10], що істотно підвищує вартість цього матеріалу.

Авторами [6] запропоновано проведення процесу спучування в гравітаційно-падаючому шарі, під час якого розподілені частки інтеркальованого і спученого графіту під дією сили тяжіння рухаються вниз. Час спучування становить лише 1-3 с.

Для реалізації цього процесу необхідні початкові знання про шари інтеркальованого графіту з наступним переходом від насипного шару матеріалу, який піддається диспергуванню дозатором, до руху «хмари» з одиночних частинок під дією гравітації в гравітаційно-падаючому шарі.

Мета статті. Розглянути первинний процес інтеркаляції металургійного графіту, який практично не вивчений.

Виклад основного матеріалу. Процес отримання термічно розширеного графіту складається з двох основних стадій: 1) отримання інтеркальованого графіту; 2) термошокового нагріву частинок інтеркальованого графіту; в результаті останнього утворюється термічно розширений графіт. Властивості інтеркальованого графіту істотно впливають на властивості термічно розширеного графіту. Особливо це відчувається в гравітаційно-падаючому шарі, коли в реакторі частинки інтеркальованого графіту рухаються під дією результуючої сил гравітації і лобового опору.

Для проведення чистого експерименту по процесам інтеркаляції металургійного графіту був використаний графіт, що отримується з відходів, що утворилися в міксерному відділенні та відділенні десульфуратції. Ці графітовмісткі відходи в промислових умовах проходять процеси флотатійної і хімічної обробки для видалення всіх домішок з графіту. Одержуваний таким способом графіт відповідає марці ГАК-2 з зольністю менше 0,5%. У процесі дослідження інтеркаляцію проводили в 5% розчині $K_2Cr_2O_7$ в концентрованій сірчаній кислоті (98%) за раніше розробленою методикою [11].

З отриманих в роботі [12] даних випливає, що об'ємна щільність термічно розширеного графіту ($\rho_{ТРГ}$) істотно залежить від співвідношення $m_{інтеркаланта} : m_{графіта}$ в межах 0,1-0,2, в якому $m_{інтеркаланта}$ – маса інтеркаланта, яка припадає на одиницю маси графіту; $m_{графіта}$ – одинична маса графіту. Подальше збільшення цього співвідношення практично не впливає на величину $\rho_{ТРГ}$. Тому в подальшому окислювання графіту проводилося при співвідношенні $m_{інтеркаланта} : m_{графіта} = 0,16$. Дослідний зразок окисленого графіту після ретельного відмивання в воді і сушки до повітряно-сухого стану при температурі 105°C містив 1 кг графіту і 0,16 кг інтеркаланта, який знаходився між площинами графіту. З огляду на те, що щільність інтеркалюючої рідини близька до щільності концентрованої сірчаної кислоти ($\rho_{H_2SO_4} = 1700 - 1830 \text{ кг/м}^3$), шляхом об'ємно-масових розрахунків було встановлено, що за даних умов (1 кг графіту + 0,16 кг інтеркаланта) об'єм інтеркаланта перевищує об'єм графіту на 18,82% об. За рахунок цього відбувається деяке розширення графіту уздовж осі «С» графіту. З одного боку мало б відбуватися збільшення насипної щільності графіту до 464 кг/м^3 , а з іншого боку – збільшення об'єму графіту в 1,0376 рази. Насипна щільність окисленого графіту за всіма розрахунками повинна б знизитися і скласти 447 кг/м^3 , однак експеримент показує, що насипна щільність окисленого графіту знижується до 360 кг/м^3 . Аналіз літературних джерел [8, 9, 13] свідчить, що в процесі інтеркаляції відбувається розширення кристалів графіту, а так само порушення суцільності, розтріскування і інші розпушувальні процеси. Для опису процесу інтеркаляції був прийнятий коефіцієнт розширення кристала графіту уздовж осі «С» рівний 1,4, а також був введений нами вперше коефіцієнт порушення цілісності графіту «К», без якого неможливо описати процес розширення при інтеркаляції графіту в повній мірі.

Розглянемо довільний об'єм інтеркальованого графіту, маса якого складається з маси графіту $M_{Г}$ і маси інтеркаланта $M_{інтеркаланта}$. Об'єм цього шару складається з насипного об'єму графіту $V_{н.г}$ і об'єму інтеркаланта $V_{інтеркаланта}$. При цьому необхідно враховувати розширення решітки кристалів графіту, яке в загальному випадку може бути прийнято 1,4 за даними монографії [13], а також запропонований нами коефіцієнт порушення цілісності графіту.

Всі ці міркування дозволили запропонувати в загальному вигляді початкову формулу для визначення об'ємної щільності шару інтеркальованого графіту, $\rho_{i.г}$:

$$\rho_{i.г} = \frac{M_{Г} + M_{інтеркаланта}}{V_{н.г} + V_{інтеркаланта} \cdot 1,4 \cdot K}, \text{ кг/м}^3, \quad (1)$$

де M_{Γ} – маса графіту, кг; $M_{\text{інтеркаланта}}$ – маса інтеркаланта, кг; $V_{\text{н.г}}$ – насипний об’єм графіту, м^3 ; $V_{\text{інтеркаланта}}$ – об’єм інтеркаланта, м^3 ; K – коефіцієнт порушення цілісності графіту.

Розглянемо кожну складову окремо. Масу інтеркаланта можна представити у вигляді прийнятого співвідношення $m_{\text{інтеркаланта}} : m_{\text{графіта}}$ і маси графіту M_{Γ} . Тоді маса графіту з інтеркалантом:

$$M_{\Gamma} + M_{\text{інтеркаланта}} = M_{\Gamma} \cdot \left(1 + \frac{m_{\text{інтеркаланта}}}{m_{\text{графіта}}}\right), \text{ кг.} \quad (2)$$

У зв’язку з тим, що інтеркалант завжди знаходиться між окремими шарами графіту, то його об’єм тісно пов’язаний з об’ємом самого графіту.

Тому величину істинного об’єму графіту, V_{Γ} , м^3 , який бере участь в процесі інтеркаляції, можна обчислити із співвідношення:

$$V_{\Gamma} = V_{\text{н.г}} \cdot \frac{\rho_{\text{н.г}}}{\rho_{\Gamma}}, \text{ м}^3, \quad (3)$$

де V_{Γ} – істинний об’єм графіту, який бере участь в процесі інтеркаляції, м^3 ; $V_{\text{н.г}}$ – насипний об’єм графіту, м^3 ; $\rho_{\text{н.г}}$ – насипна щільність графіту, $\text{кг}/\text{м}^3$; ρ_{Γ} – пікнометрична щільність графіту, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Об’єму частку інтеркаланта щодо чистого графіту можна отримати із співвідношення:

$$\frac{V_{\text{інтеркаланта}}}{V_{\Gamma}} = \frac{m_{\text{інтеркаланта}}}{\rho_{\text{інтеркаланта}}} \cdot \frac{\rho_{\Gamma}}{m_{\Gamma}}; \quad (4)$$

$$V_{\text{інтеркаланта}} = V_{\Gamma} \cdot \frac{m_{\text{інтеркаланта}}}{\rho_{\text{інтеркаланта}}} \cdot \frac{\rho_{\Gamma}}{m_{\Gamma}}. \quad (5)$$

Тоді об’єм інтеркаланта:

$$V_{\text{інтеркаланта}} = V_{\text{н.г}} \cdot \frac{\rho_{\text{н.г}}}{\rho_{\Gamma}} \cdot \frac{m_{\text{інтеркаланта}}}{\rho_{\text{інтеркаланта}}} \cdot \frac{\rho_{\Gamma}}{m_{\Gamma}}. \quad (6)$$

Все це дозволяє запропонувати наступну формулу для визначення об’ємної щільності інтеркальованого графіту, $\rho_{\text{i.г}}^{\text{нас}}$:

$$\rho_{\text{i.г}}^{\text{нас}} = \frac{M_{\Gamma}}{V_{\text{н.г}}} \cdot \frac{1 + \frac{m_{\text{інтеркаланта}}}{m_{\Gamma}}}{\left(1 + \frac{\rho_{\text{н.г}}}{\rho_{\Gamma}} \cdot \frac{m_{\text{інтеркаланта}}}{\rho_{\text{інтеркаланта}}} \cdot \frac{\rho_{\Gamma}}{m_{\Gamma}}\right) \cdot 1,4 \cdot K}, \text{ кг}/\text{м}^3. \quad (7)$$

У зв’язку з тим, що перший співмножник являє собою насипну щільність графіту, то остаточна формула має вигляд:

$$\rho_{\text{i.г}}^{\text{нас}} = \rho_{\text{н.г}} \cdot \frac{1 + \frac{m_{\text{інтеркаланта}}}{m_{\Gamma}}}{1 + \frac{m_{\text{інтеркаланта}}}{m_{\Gamma}} \cdot \frac{\rho_{\text{н.г}}}{\rho_{\text{інтеркаланта}}} \cdot 1,4 \cdot K}, \text{ кг}/\text{м}^3. \quad (8)$$

Таким чином, величина $\frac{\rho_{\text{н.г}} \cdot m_{\text{інтеркаланта}}}{\rho_{\text{інтеркаланта}} \cdot m_{\Gamma}}$ характеризує розширення графіту за рахунок інтеркаланта, коефіцієнт 1,4 характеризує розширення решітки графіту, а величина « K » – коефіцієнт порушення цілісності графіту – характеризує розтріскування, розшарування і т. п. в процесі інтеркаляції.

Для визначення емпіричного об’ємного коефіцієнту порушення цілісності графіту « K » використовували результати раніше проведених експериментів на основі графіту акумуляторного марки ГАК-2. Методики наведені в [14]. На підставі більш пізніх досліджень [12] показано, що об’ємна щільність термічно розширеного графіту практично не змінюється при співвідношенні $m_{\text{інтеркаланта}} : m_{\text{графіта}}$ більше 0,12-0,15. Тому в даному дослідженні процес інтеркаляції здійснювався при співвідношенні, рівному 0,16, при різному часі інтеркаляції. На підставі за-

пропонованого рівняння і результатів експериментів були обчислені коефіцієнти порушення цілісності графіту при різних умовах інтеркаляції.

На рисунку представлена залежність коефіцієнту порушення цілісності графіту «*K*» від величини об'ємної щільності інтеркальованого графіту.

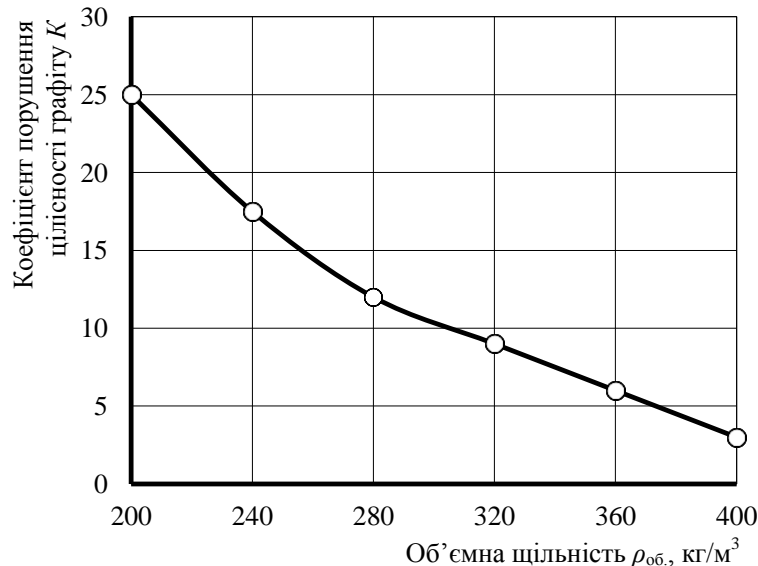


Рисунок – Залежність коефіцієнту порушення цілісності графіту *K* від об'ємної щільності інтеркальованого графіту

Отримана експериментальна залежність в системі координат «*K*- $\rho_{i,r}$ » є слабоопуклою лінією, яка близька до лінійної залежності на початковій ділянці і тільки при дуже сильному окисленні при об'ємній щільності інтеркальованого графіту менш за 260 кг/м³ вона різко загинається вгору. Тому для технічних розрахунків була запропонована залежність:

$$K = K_{\max} \cdot \beta \cdot (\rho_{i,r} - \rho_{i,r\min}), \quad (9)$$

де $\rho_{i,r\min}$ – мінімальна насипна щільність інтеркальованого графіту на даній ділянці кривої; $\rho_{i,r}$ – експериментальна насипна щільність інтеркальованого графіту на даній ділянці кривої.

Було встановлено, що для інтервалу об'ємної щільності інтеркальованого графіту в межах 390-300 кг/м³ справедлива лінійна залежність:

$$K_I = 10,38 - 0,082 \cdot (\rho_{i,r} - 300). \quad (10)$$

У цьому інтервалі похибка лінеаризації не перевищує 2,3%, що допустимо для технічних розрахунків. Подальше посилення інтеркаляції ($\rho_{i,r} < 300$ кг/м³) призводить до істотного збільшення похибки.

При необхідності подальшого посилення інтеркаляції в інтервалі (290-260 кг/м³) може бути запропонована лінійна залежність:

$$K_{II} = 14,89 - 0,10 \cdot (\rho_{i,r} - 260). \quad (11)$$

У цьому інтервалі так само досягнута максимальна похибка не більше 2,3%.

Ще більша інтеркаляція графіту ($\rho_{i,r} < 260$ кг/м³), вочевидь, пов'язана зі значним розтріскуванням частинок, при цьому величина коефіцієнту *K* різко збільшується.

При інтеркаляції графіту насипна щільність знижується з 400 до 240 кг/м³ при одночасному збільшенні насипного об'єму шару до 1,93 м³ інтеркальованого графіту на 1 м³ вихідного графіту.

У процесі обробки матеріалів в гравітаційно-падаючому шарі важливо мати чітке уявлення про морфологію частинок. З літератури [11] відомо, що будь-яке розширення графіту відбувається в напрямку осі «С» графіту. Тому і розширення частинок графіту буде відбуватися тільки в цьому напрямку.

З огляду на наведені дані, можна припустити, що вже в процесі інтеркаляції до термошо-

кового нагріву частинки будуть розширюватися в 1,45-4,65 разів в напрямку «С» і це необхідно врахувати при русі частинок в гравітаційно-падаючому шарі.

Результати проведених розрахунків і досліджень показали, що запропоноване рівняння може бути використано при обчисленні насипної щільності інтеркальованого графіту.

Висновки

1. Розглянуто дві стадії процесу отримання термічно розширеного графіту в режимі гравітаційно-падаючого шару. Визначено важливість для цього процесу знання особливостей першої стадії – отримання інтеркальованого графіту і властивості отриманого матеріалу.

2. Запропоновано нову модель розрахунку насипної щільності інтеркальованого графіту з металургійного графіту, що дозволило отримати формулу для обчислення цього параметру.

3. Введено нове поняття – «коефіцієнт порушення цілісності графіту K » для розрахунку насипної щільності інтеркальованого графіту. На підставі наведених експериментів визначено цей параметр в інтервалі об'ємної щільності інтеркальованого графіту 390-260 кг/м³ з одночасним збільшенням насипного об'єму шару до 1,93 м³ інтеркальованого графіту на 1 м³ вихідного графіту. Запропоновано формулу для обчислення цього параметру. Отримано остаточне рівняння для розрахунку об'ємної щільності в залежності від вихідних параметрів.

Список використаних джерел:

1. Маслов В.А. Дисперсные железорафитовые отходы металлургического производства как сырье для получения новых материалов / В.А. Маслов, Л.А. Трофимова, Л.А. Дан // Сталь. – 2009. – № 3. – С. 67-70.
2. Кравець В.А. Дослідження властивостей металургійного графіту з метою подальшої утилізації / В. А. Кравець // Збірник наукових праць Донбаської національної академії будівництва і архітектури. – Краматорськ : ДонНАБА, 2018 (11). – № 1. – С. 38-52.
3. Маслов В.А. Новое направление переработки дисперсных железорафитовых отходов металлургического производства / В.А. Маслов, Л.А. Трофимова, Л.А. Дан // Вісник Приазовського державного технічного університету : Зб. наук. пр. / ПДТУ. – Маріуполь, 2008. – Вип. 17. – С 32-36.
4. Маслов В.А. Особенности подготовки к переработке дисперсных железорафитовых отходов отделения десульфурации / В.А. Маслов, Л.А. Трофимова, Л.А. Дан // Вісник Приазовського державного технічного університету: Зб. наук. пр. / ПДТУ. – Маріуполь, 2010. – Вип. 20. – С. 144-148. – (Серія: Технічні науки).
5. Маслов В.О. Композиційні матеріали на основі залізографітових відходів металургійного виробництва / В.О. Маслов // Хімічна промисловість України. – 1994. – № 4. – С. 54-60.
6. А. с. 1579008 СССР, МКИ С 01 В 31/04. Способ получения расширенного графита / В.А. Маслов [и др.]. – № 4392502; приоритет изобретения 15.03.1988 (ДСП).
7. А. с. 767023 СССР, МКИ С 01 В 31/04. Способ получения расширенного графита / А.Н. Антонов [и др.]. – № 2610959/23-26; заявл. 09.03.78; опубл. 30.09.80, Бюл. № 36.
8. Махорин К.Е. Вспучивание природного графита, обработанного серной кислотой / К.Е. Махорин, А.П. Кожан, В.В. Веселов // Химическая технология. – 1985. – № 2. – С. 3-6.
9. Вспучивание графита в плотном и взвешенном слоях / К.Е. Махорин, А.П. Кожан, В.В. Веселов, В.Н. Александров // Химическая технология. – 1987. – № 2. – С.43-49.
10. Pat. JPS60118618A Japan, IPC CO31B31/04. Method for decreasing residual sulfur contained in expanded graphite / Toshihisa Maeda. – № JP58222358A; app. 25.11.83; publ. 26.06. 26.06.85.
11. Физико-химические свойства графита и его соединений / Черныш И.Г. [и др.]. – К. : Наукова думка, 1990. – 200 с.
12. Возможность получения термографенита с магнитными свойствами из дисперсных железорафитовых отходов металлургии / В.А. Маслов, Ю.П. Пустовалов, Л.А. Трофимова, Л.А. Дан // Вісник Приазовського державного технічного університету: Зб. наук. пр. / ПДТУ. – Маріуполь, 2017. – Вип. 34. – С. 24-30. – (Серія: Технічні науки).
13. Динамика превращения соединений интеркалирования графита при термошоковом нагреве / В.А. Маслов, Ю.П. Пустовалов, Л.А. Трофимова, Л.А. Дан // Вісник Приазовського державного технічного університету : Зб. наук. пр. / ПДТУ. – Маріуполь, 2019. – Вип. 38. –

С. 23-30. – (Серія: Технічні науки). – Режим доступу : <https://doi.org/10.31498/2225-6733.38.2019.181270>.

14. Исследование процесса окисления дисперсных ЖГО с целью получения соединений интеркалирования графита / В.А. Маслов, Ю.П. Пустовалов, Л.А. Трофимова, Л.А. Дан // Вісник Приазовського державного технічного університету : Зб. наук. пр. / ПДТУ. – Маріуполь, 2016. – Вип. 32. – С. 48-53. – (Серія: Технічні науки).

References:

1. Maslov V.A., Trofimova L.A., Dan L.A. Dispersnye zhelezografitovye othody metallurgicheskogo proizvodstva kak syr'e dlya polucheniya novykh materialov [Disperse Fe-C containing wastes of metallurgy as raw material for new materials]. *Stal' – Steel*, 2009, no. 3, pp.67-70. (Rus.)
2. Kravec V.A. Doslidzhennya vlastivostej metalurgijnogo grafitu z metoyu podalshoyi utilizaciyi [Investigation of the properties of metallurgical graphite for further utilization]. *Zbirnik naukovikh prats' Donbas'koï natsional'noi akademii budivnitstva i arkhitekturi – Collection of scientific works of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture*, 2018 (11), no. 1, pp. 38-52. (Ukr.)
3. Maslov V.A., Trofimova L.A., Dan L.A. Novoe napravlenie pererabotki dispersnyh zhelezografitovyh othodov metallurgicheskogo proizvodstva [A new direction of processing of dispersed Fe-C waste of metallurgical production]. *Visnik Priazovs'kogo Derzhavnogo Tekhnichnogo Universitetu – Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section*, 2008, vol. 17, pp. 32-36. (Rus.)
4. Maslov V.A., Trofimova L.A., Dan L.A. Osobennosti podgotovki k pererabotke dispersnyh zhelezografitovyh othodov otdeleniya desulfuracii [Features of preparation for the processing of dispersed Fe-C waste of the desulfurization]. *Visnik Priazovs'kogo Derzhavnogo Tekhnichnogo Universitetu. Seriya: Tekhnichni nauki – Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical sciences*, 2010, vol. 20, pp. 144-148. (Rus.)
5. Maslov V.O. Kompozicijni materialy na osnovi zalizografitovyh vidhodiv metalurgijnogo virobnictva [Composition materials on the basis of Fe-C containing wastes of metallurgy]. *Khimichna promislovist' Ukraini – Chemical industry of Ukraine*, 1994, no. 4, pp. 54-60. (Ukr.)
6. Maslov V.A., V.I. Pauk, Pustovalov Yu.P. *Sposob polucheniya rasshirennoho grafita* [The method of obtaining thermally expanded graphite]. Patent USSR, no. 1579008, 1988. (Rus.)
7. Antonov A.N., Ivanov V.A., Timorin V.D., Fedoseev S.D., Makevnina L.F., Rybalov V.A. *Sposob polucheniya rasshirennoho grafita* [Method for obtaining expanded graphite]. Patent USSR, no. 767023, 1980. (Rus.)
8. Mahorin K. E., Kozhan A.P., Veselov V.V. Vspuchivanie prirodnoho grafita, obrabotannogo sernoj kislotoj [Extrusion of natural graphite treated with sulfuric acid]. *Himicheskaja tehnologija – Chemical Technology*, 1985, no. 2, pp. 3-6. (Rus.)
9. Mahorin K.E., Kozhan A.P., Veselov V.V., Aleksandrov V.N. Vspuchivanie grafita v plotnom i vzveshennom slojah [Graphite swelling in dense and suspended layers]. *Himicheskaja tehnologija – Chemical Technology*, 1987, no. 2, pp. 43-49.
10. Toshihisa Maeda. Method for decreasing residual sulfur contained in expanded graphite. Patent Japan, no. JP58222358A, 1985.
11. Chernysh I.G., Karpov I.I., Prikhod'ko G.P., Shai V.M. *Fiziko-himicheskie svojstva grafita i ego soedinenij* [Physico-chemical properties of graphite and its connections]. Kyev, Naukova dumka Publ., 1990. 200 p. (Rus.)
12. Maslov V.A., Pustovalov Yu.P., Trofimova L.A., Dan L.A. Vozmozhnost' polucheniya termografenita s magnitnymi svojstvami iz dispersnyh zhelezografitovyh othodov metallurgii [The possibility of obtaining thermogranite with magnetic properties from dispersed iron-graphite waste metallurgy]. *Visnik Priazovs'kogo Derzhavnogo Tekhnichnogo Universitetu. Seriya: Tekhnichni nauki – Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical sciences*, 2017, vol. 34, pp. 24-30. (Rus.)
13. Maslov V.A., Pustovalov Yu.P., Trofimova L.A., Dan L.A. Dinamika prevrasheniya soedinenij interkalirovaniya grafita pri termoshokovom nagreve [Dynamics of turning of the intercalated graphite compounds at thermal shock heating]. *Visnik Priazovs'kogo Derzhavnogo Tekhnichnogo*

Universitetu. Serii: Tekhnichni nauki – Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical sciences, 2019, vol. 38, pp. 23-30. doi: 10.31498/2225-6733.38.2019.181270.

14. Maslov V.A., Pustovalov Yu.P., Trofimova L.A., Dan L.A. Issledovanie processa okisleniya dispersnyh zhelezografitovyh othodov s cel'yu polucheniya soedinenij interkalirovaniya grafita [The study of oxidation process of dispersed Fe-C containing waste to obtain intercalation compounds of graphite]. *Visnik Priazovs'kogo Derzhavnogo Tekhnichnogo Universitetu. Serii: Tekhnichni nauki – Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical sciences, 2016, vol. 32, pp. 48-53. (Rus.)*

Рецензент: В.Б. Семакова
канд. техн. наук, доц., ДВНЗ «ПДТУ»

Стаття надійшла 19.04.2021

УДК 622.781

doi: 10.31498/2225-6733.42.2021.240575

© Чупринов Є.В.¹, Лялюк В.П.², Журавльов Ф.М.³,
Швед С.В.⁴, Василенко І.А.⁵

АЕРОДИНАМІЧНЕ РОЗДІЛЕННЯ ЗАЛІЗОРУДНИХ ОКАТИШІВ ПО КРУПНОСТІ

Розглянуто можливість організації повітряної класифікації обпалених окатишів на відкритих складах готової продукції. Досліджено особливості вибору конструктивних умов аеродинамічного сортування окатишів, що забезпечують максимальні і достатні відстані між частинками різних розмірів на встановленому горизонті для сортування окатишів за їх розмірами. Теоретично показана можливість класифікації обпалених окатишів повітряним потоком з відділенням необхідних крупності і кількості фракцій при їх вивантаженні зі стрічкового конвеєра.

Ключові слова: окатиші, класифікація, повітряний потік, аеродинаміка, моделювання.

E.V. Chuprinov, V.P. Lyalyuk, F.M. Zhuravlev, S.V. Shved, I.A. Vasylenko. Aerodynamic separation of iron ore pellets by size. The studies on reheating of fired pellets of a suitable fraction used in the bottom and side beds have been analyzed. It has been shown that due to the loss of the crystallization of the glass iron silicate bond, the strength of the pellets decreases at their reduction and their destruction in the metallurgical unit increases, thus leading to a deterioration in its performance. It has been concluded that for the bed, it is necessary to purposefully separate the fraction of the pellets of the required size that does not fall into the finished product. The ways of organizing air classification of fired pellets in open warehouses of finished products have been studied and the possibility of its organization has been considered. The particle trajectories and the factors influencing this process have been analyzed. It has been shown that an important charac-

¹ канд. техн. наук, доцент, Навчально-науковий технологічний інститут Державного університету економіки і технологій, м. Кривий Ріг, ORCID: 0000-0001-8605-3434, itchupa@gmail.com

² д-р техн. наук, професор, Навчально-науковий технологічний інститут Державного університету економіки і технологій, м. Кривий Ріг, ORCID: 0000-0001-7258-2079, vitalij.lyalyuk@gmail.com

³ канд. техн. наук, доцент, Навчально-науковий технологічний інститут Державного університету економіки і технологій, м. Кривий Ріг

⁴ канд. техн. наук, доцент, Навчально-науковий технологічний інститут Державного університету економіки і технологій, м. Кривий Ріг

⁵ канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет», м. Дніпро, innav@i.ua

teristic of the particles dispersion is the influence of the ratio of the coefficient of viscous resistance to the flight of a particle in the air to the mass of a particle, as a result of which an initially flat flow for the particles of different sizes will disintegrate into a fan. This fan of the particles scattering at a certain height can be used to sort them by size class. The conditions have been determined under which the dispersion of the fan of the particles in the horizontal plane will be maximum. Equations have been proposed to describe the law of motion of particles before hitting the jet and after having been blown off by the jet. Mechanisms have been developed for selecting design conditions under which the horizontal distances between the particles of different sizes (the difference of the corresponding coordinates) at the set horizon will be maximum and sufficient for sorting the particles by their size. The visualization of the process of the particle scattering in the MathCAD software environment has been performed, which makes it possible for the technologist to set the initial conditions he needs and to obtain clearly presented final results of the motion of a fan of the particles of different sizes that are clear to him.

Keywords: pellets, classification, air flow, aerodynamics, modelling.

Постановка проблеми. Після термозміцнення сирих окатишів на конвеєрній обпалювальній машині, охолоджені обпалені окатиші поділяються на трьохпродуктовому вібраційному грохоті на три наступні фракції: 0-5 мм – дріб'язок, що не придатний для металургійного використання та є обпаленим зворотом, що направляється після подрібнення в шихту, 5-10 мм – проміжна фракція, яку направляють в готову продукцію, а також 10-16 мм, 10-18 мм, 10-20 мм або 10-25 мм – основна фракція для донної і бортової постілі і готової продукції [1].

Кожна з виділених фракцій використовується згідно вимог відпрацьованої технології термозміцнення сирих окатишів на конвеєрній обпалювальній машині і вимог подальшого використання отриманих обпалених окатишів в різних металургійних агрегатах для їх відновлення в доменній і бездоменній металургії заліза. Крім того, як показали дослідження, повторний нагрів обпалених окатишів придатної фракції, що використовувались в донній і бортовій постілі, за рахунок розкристалізації скляної залізолікатної зв'язки, знижує їх міцність при відновленні і збільшує їх руйнування в металургійному агрегаті, погіршуючи показники його роботи. Тому для постілі потрібно цілеспрямовано відокремлювати фракцію окатишів необхідної крупності, що не включається в готову продукцію [2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Донна постіль використовується для запобігання забивання живого перетину колосникового поля обпалювального візка сирими окатишами, захисту колосників від перегріву в високотемпературних зонах горна, поліпшення якості готового продукту за рахунок створення раціональної мінімальної різниці температури на кордоні шар-постіль і верху шару, а також для підвищення ступеня термозміцнення сирих окатишів нижньої частини шару. Бортова постіль використовується для поліпшення якості обпалення сирих окатишів у бортів випалювальних візків, вирівнювання ступеня термозміцнення сирих окатишів по ширині машини і захисту бортів випалювальних візків від перегріву в високотемпературних зонах горна. Кількість донної і бортової постілі становить 30-35% від маси готової продукції [2].

Через низьку ефективність грохотів розділити обпалені окатиші на зазначені фракції якісно не представляється можливим. Свого часу авторами роботи [3] запропонований спосіб повітряної класифікації агломерату і обпалених окатишів, для чого була створена конструкція промислового повітряного класифікатора і встановлена можливість ефективної класифікації обпалених окатишів в повітряному середовищі перед відвантаженням готової продукції споживачам з відділенням некондиційної дрібної фракції (-5 мм).

Мета статті – розробка способу класифікації обпалених окатишів на відкритих складах готової продукції.

Викладення основного матеріалу. При сьогоднішній продуктивності гірничозбагачувальних комбінатів з виробництва окатишів необхідно мати велику кількість повітряної класифікації обпалених окатишів, що не є раціональним. Найбільш просто організувати повітряну класифікацію обпалених окатишів на відкритих складах готової продукції.

Розглянемо можливість такої класифікації. Нехай плоский одношаровий потік сферичних

частинок однакової щільності, але різного розміру, викидається під деяким кутом до горизонту з деякою початковою швидкістю. Кожна частка потоку під дією аеродинамічного опору в нерухомому повітрі відхиляється вниз більш істотно, ніж при вільному польоті в умовах безповітряного середовища. Відомо, що на траєкторію польоту в повітрі, в кінцевому рахунку, впливає відношення коефіцієнта в'язкого опору польоту частки в повітрі до маси частки. Внаслідок відмінності зазначеного відношення для частинок різного розміру спочатку плоский потік розпадеться в віяло. Віяло розльоту частинок на деякій його висоті можна використовувати для їх сортування по класам крупності. Визначимо умови, при яких дисперсія віяла частинок в горизонтальній площині буде максимальною.

Закон руху, а, отже, і траєкторія руху кожної частинки в прямокутній системі координат (рис. 1) визначається з системи рівнянь:

$$\begin{cases} \ddot{x} = -\frac{1}{m} F_x \\ \ddot{y} = -g - \frac{1}{m} F_y \end{cases}, \quad (1)$$

де \ddot{x} , \ddot{y} – прискорення частинок уздовж відповідних осей координат, м/с^2 ; F_x , F_y – сила аеродинамічного опору руху частки в проекціях на відповідні осі координат, Н; m і g – відповідно, маса частинки, кг і прискорення вільного падіння, м/с^2 .

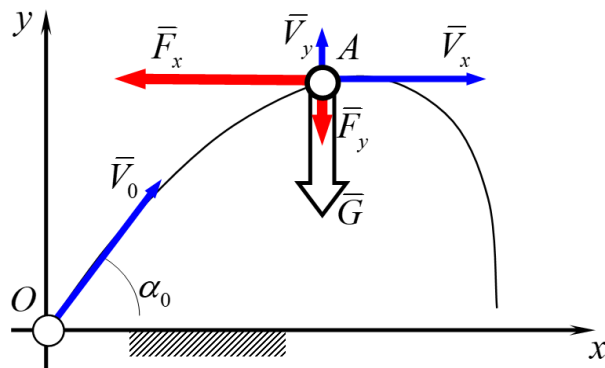


Рис. 1 – Розрахункова схема сил

Маса частинки може бути виражена через її характерний розмір d , мм і щільність її матеріалу ρ_0 , кг/м^3 :

$$m = \rho_0 \frac{4}{3} \pi \frac{d^3}{8} = \frac{\pi}{6} \rho_0 \cdot d^3. \quad (2)$$

Проекції сили аеродинамічного опору пропорційні квадратам відповідних проекцій швидкості частинки v_x і v_y , м/с :

$$\begin{cases} F_x = c \cdot \frac{\rho \cdot v_x^2}{2} \cdot \frac{\pi d^2}{4} \\ F_y = c \cdot \frac{\rho \cdot v_y^2}{2} \cdot \frac{\pi d^2}{4} \end{cases}, \quad (3)$$

де c – безрозмірний коефіцієнт аеродинамічного опору кулі; ρ – масова густина повітря при нормальних умовах, кг/м^3 .

Підставимо (2) і (3) в (1) і в результаті отримаємо:

$$\begin{cases} \ddot{x} = -\frac{0,424}{\rho_0 d} \cdot v_x^2 \\ \ddot{y} = -g - \frac{0,424}{\rho_0 d} \cdot v_y^2 \end{cases}. \quad (4)$$

Визначення диференціального рівняння $\ddot{x} = -\frac{0,424}{\rho_0 d} \cdot v_x^2$ з (4) послідовно набуде вигляду:

$$\frac{\partial v_x}{\partial t} = -\frac{0,424}{\rho_0 d} \cdot v_x^2 = 0,$$

$$\int \frac{1}{v_x^2} \cdot \partial v_x = -\frac{0,424}{\rho_0 d} \cdot \int \partial t,$$

$$-\frac{1}{v_x} = -\frac{0,424}{\rho_0 d} \cdot t + C.$$

При $t = 0$, $v_x = v_0 \cdot \cos \alpha_0$. Звідки $C = -\frac{1}{v_0 \cdot \cos \alpha_0}$.

$$-\frac{1}{v_x} = -\frac{0,424}{\rho_0 d} \cdot t - \frac{1}{v_0 \cdot \cos \alpha_0},$$

$$v_x = \frac{v_0 \cos \alpha_0 \cdot \rho_0 d}{0,424 \cdot v_0 \cos \alpha_0 \cdot t + \rho_0 d}, \quad (5)$$

$$x = \int \frac{v_0 \cos \alpha_0 \cdot \rho_0 d}{0,424 \cdot v_0 \cos \alpha_0 \cdot t + \rho_0 d} \partial t,$$

$$x = 2,358 \cdot \rho_0 d \cdot \ln \left(\frac{0,424 \cdot v_0 \cos \alpha_0}{\rho_0 d} \cdot t + 1 \right) + C.$$

При $t = 0$, $x = 0$. Звідки $C = 0$.

Таким чином, закон руху частинки вздовж горизонтальної осі координат набуде вигляду:

$$x = 2,358 \cdot \rho_0 d \cdot \ln \left(\frac{0,424 \cdot v_0 \cos \alpha_0}{\rho_0 d} \cdot t + 1 \right). \quad (6)$$

Рішення диференціального рівняння $\ddot{y} = -g - \frac{0,424}{\rho_0 d} \cdot v_y^2$ з (4) послідовно прийме наступний вигляд:

$$\frac{\partial v_y}{\partial t} = -\frac{0,424}{\rho_0 d} \cdot v_y^2 - g,$$

$$x = \int \frac{v_0 \cos \alpha_0 \cdot \rho_0 d}{0,424 \cdot v_0 \cos \alpha_0 \cdot t + \rho_0 d} \partial t,$$

$$\int \frac{\rho_0 d}{0,424 v_y^2 + g \rho_0 d} \partial v_y = -\int \partial t,$$

$$1,536 \cdot \sqrt{\frac{\rho_0 d}{g}} \cdot \arctan \left(\frac{0,651 \cdot v_y}{\sqrt{g \rho_0 d}} \right) = -t + C. \quad (7)$$

При $t = 0$, $v_y = v_0 \cdot \sin \alpha_0$. Звідки $C = 1,536 \cdot \sqrt{\frac{\rho_0 d}{g}} \cdot \arctan \left(\frac{0,651 \cdot v_0 \sin \alpha_0}{\sqrt{g \rho_0 d}} \right)$.

З (7) знаходимо:

$$v_y = \frac{\sqrt{g \rho_0 d}}{0,651} \cdot \tan \left(\frac{C - t}{1,536 \cdot \sqrt{\frac{\rho_0 d}{g}}} \right).$$

З урахуванням знайденого значення постійної інтегрування отримуємо

$$v_y = \frac{\sqrt{g\rho_0 d}}{0,651} \cdot \tan \left[\arctan \left(\frac{0,651 \cdot v_0 \sin \alpha_0}{\sqrt{g\rho_0 d}} \right) - \frac{t}{1,536 \cdot \sqrt{\frac{\rho_0 d}{g}}} \right]. \quad (8)$$

Далі проводимо друге послідовне інтегрування.

$$y = \frac{\sqrt{g\rho_0 d}}{0,651} \cdot \int \tan \left[\arctan \left(\frac{0,651 \cdot v_0 \sin \alpha_0}{\sqrt{g\rho_0 d}} \right) - \frac{t}{1,536 \cdot \sqrt{\frac{\rho_0 d}{g}}} \right] dt,$$

$$y = -1,18\rho_0 d \cdot \ln \left\{ 1 + \tan \left[\frac{0,651 \cdot v_0 \sin \alpha_0}{\sqrt{g\rho_0 d}} - \frac{0,651 \cdot t}{\sqrt{\frac{\rho_0 d}{g}}} \right]^2 \right\} + C.$$

При $t = 0, y = 0$. Звідки $C = 1,18\rho_0 d \cdot \ln \left[1 + \tan \left(\frac{0,651 \cdot v_0 \sin \alpha_0}{\sqrt{g\rho_0 d}} \right)^2 \right]$.

Таким чином, закон зміни вертикальної координати в часі набуде вигляду:

$$y = -1,18\rho_0 d \cdot \ln \left\{ 1 + \tan \left[\frac{0,651 \cdot v_0 \sin \alpha_0}{\sqrt{g\rho_0 d}} - \frac{0,651 \cdot t}{\sqrt{\frac{\rho_0 d}{g}}} \right]^2 \right\} + 1,18\rho_0 d \cdot \ln \left[1 + \tan \left(\frac{0,651 \cdot v_0 \sin \alpha_0}{\sqrt{g\rho_0 d}} \right)^2 \right]. \quad (9)$$

Інтерпретація отриманих результатів показує, що в межах допустимих висот падіння частинок, віяло їх розльоту в горизонтальній площині занадто вузьке, щоб використовувати його для сортування по крупності (рис. 2).

Для збільшення ширини віяла розльоту частинок по крупності слід впливати на них додатковим вузьконаправленим потоком повітря. Проведемо вибір параметрів цього додаткового потоку, з метою розширення віяла їх розльоту. Визначимо параметри повітряного потоку з метою аеродинамічного поділу частинок за фракціями.

Для вирішення поставленої задачі в певній точці B траєкторії польоту частинок під кутом α_B до нього прикладається імпульсний вплив \bar{U} , м/с, плоским струменем стисненого повітря (рис. 3).

Розглянемо імпульс, отриманий частинкою від дії струменя, і подальшу траєкторію частинок. Рух від точки O (вильоту) до точки B (зустрічі зі струменем) є визначеним (рис. 3). Це означає, що в точці B (за траєкторією руху частинки) проекції швидкості частинки на вісі координат також відомі і визначаються закономірностями (5) і (8).

Нехай ширина струменя становить L , м, а швидкість струменя в зазначеному напрямку становить \bar{v}_u , м/с. Тоді з огляду на обмеженість товщини струменя можна визначити час t_u , с, протягом якого частка буде перебувати під дією аеродинамічних сил з боку струменя:

$$t_u = \frac{\sqrt{v_{Bx}^2 + v_{By}^2}}{s}, \quad (10)$$

де s , мм – товщина струменя в напрямку результуючої швидкості частинки після досягнення нею точки B .

Далі визначимо величину аеродинамічної сили в проекціях на осі обраної системи координат відповідно до формули (3) і обраними позначеннями:

$$\begin{cases} F_{ux} = c \cdot \frac{\rho \cdot v_u^2 (\cos \alpha_u)^2}{2} \cdot \frac{\pi d^2}{4} \cdot \frac{\cos \alpha_u}{|\cos \alpha_u|} \\ F_{uy} = c \cdot \frac{\rho \cdot v_u^2 (\sin \alpha_u)^2}{2} \cdot \frac{\pi d^2}{4} \cdot \frac{\sin \alpha_u}{|\sin \alpha_u|} \end{cases} \quad (11)$$

Імпульс, отриманий частинкою за час дії струменя в проекціях на осі координат, складе величину:

$$\begin{cases} U_x = t_u F_{ux} = 0,071 \cdot v_u^2 (\cos \alpha_u)^2 \pi d^2 \frac{s}{\sqrt{v_{Bx}^2 + v_{By}^2}} \cdot \frac{\cos \alpha_u}{|\cos \alpha_u|} \\ U_y = t_u F_{uy} = 0,071 \cdot v_u^2 (\sin \alpha_u)^2 \pi d^2 \frac{s}{\sqrt{v_{Bx}^2 + v_{By}^2}} \cdot \frac{\sin \alpha_u}{|\sin \alpha_u|} \end{cases} \quad (12)$$

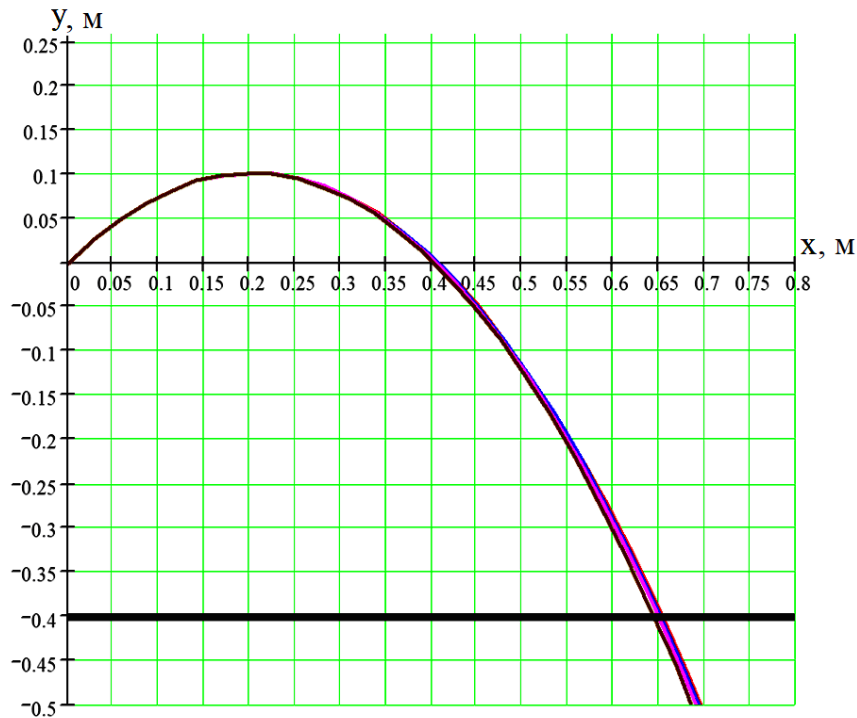


Рис. 2 – Траєкторії розльоту частинок в нерухомому повітрі «при нормальних умовах». Шкала розмірів в метрах, кут вильоту 45° (найбільше широкий розліт), початкова швидкість 2 м/с

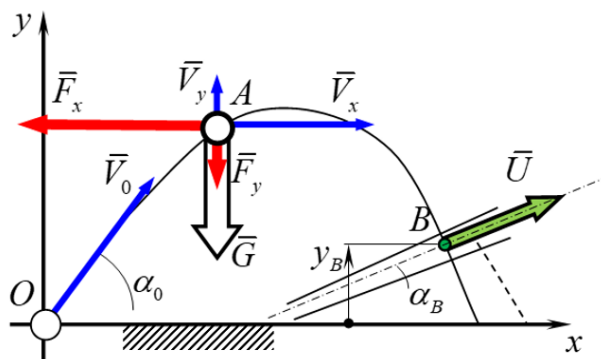


Рис. 3 – Розрахункова схема сил при імпульсному здуванні частинок

Швидкість струменя може бути обрана довільно. У зв'язку з цим вплив аеродинамічної сили з боку струменя на рух частинки може виявитися як завгодно істотним. Розраховане по (12) значення імпульсу передається від плоского струменя частинки і розганяє її у відповідному напрямку, спотворюючи траєкторію її падіння. В результаті з'являється можливість визначення швидкості, придбаной в результаті короткої дії струменя.

Вважаємо, що в процесі прикладення імпульсу з боку струменя, швидкість частинки у відповідних напрямках залишається в рамках закономірностей (5) і (8). Проекції швидкості точки після придбаного нею імпульсу позначимо v_{Bux} і v_{Buy} , м/с. Ці проекції відповідно визначимо з теореми про зміну кількості руху матеріальної точки (частки) в проекціях на осі координат:

$$\begin{cases} m(v_{Bux} - v_{Bx}) = U_x \\ m(v_{Buy} - v_{By}) = U_y \end{cases};$$

$$\begin{cases} \frac{\pi}{6} \rho_0 \cdot d^3 (v_{Bux} - v_{Bx}) = 0,071 \cdot v_u^2 (\cos \alpha_u)^2 \pi d^2 \frac{s}{\sqrt{v_{Bx}^2 + v_{By}^2}} \cdot \frac{\cos \alpha_u}{|\cos \alpha_u|} \\ \frac{\pi}{6} \rho_0 \cdot d^3 (v_{Buy} - v_{By}) = 0,071 \cdot v_u^2 (\sin \alpha_u)^2 \pi d^2 \frac{s}{\sqrt{v_{Bx}^2 + v_{By}^2}} \cdot \frac{\sin \alpha_u}{|\sin \alpha_u|} \end{cases};$$

$$\begin{cases} v_{Bux} = \frac{0,426 \cdot s}{\rho_0 \cdot d} \cdot \frac{v_u^2 (\cos \alpha_u)^2}{\sqrt{v_{Bx}^2 + v_{By}^2}} \cdot \frac{\cos \alpha_u}{|\cos \alpha_u|} + v_{Bx} \\ v_{Buy} = \frac{0,426 \cdot s}{\rho_0 \cdot d} \cdot \frac{v_u^2 (\sin \alpha_u)^2}{\sqrt{v_{Bx}^2 + v_{By}^2}} \cdot \frac{\sin \alpha_u}{|\sin \alpha_u|} + v_{By} \end{cases} \quad (13)$$

Отримані значення швидкостей приймаємо за проекції початкової швидкості частинки на новому етапі її руху, починаючи від точки B . Вертикальна координата положення точки B , як впливає з рис. 3, задається конструктивно. Тоді горизонтальна координата визначається з системи рівнянь на підставі закону руху (6) і (9):

$$\begin{cases} x_B = 2,358 \rho_0 d \cdot \ln \left(\frac{0,424 \cdot v_0 \cos \alpha_0 \cdot T_B + 1}{\rho_0 d} \right) \\ y_B = -1,18 \rho_0 d \cdot \ln \left[1 + \tan \left[\frac{0,651 v_0 \sin \alpha_0}{\sqrt{g \rho_0 d}} - \frac{0,651 \cdot T_B}{\sqrt{\frac{\rho_0 d}{g}}} \right]^2 \right] + 1,18 \rho_0 d \cdot \ln \left[1 + \tan \left(\frac{0,651 v_0 \sin \alpha_0}{\sqrt{g \rho_0 d}} \right)^2 \right] \end{cases} \quad (14)$$

Використовуючи рівняння вертикальної координати y_B (14) визначаємо момент часу T_B проходження точки B . Потім, підставляючи момент T_B проходження точки B у рівняння (14), розраховуємо горизонтальну координату x_B .

Отже, початкове положення частинки при її русі на цьому етапі знаходиться в точці B (x_B ; y_B), а початкові швидкості відповідають закономірності (13). У такому випадку для визначення закону руху частинок на цьому етапі скористаємося методикою, наведеною вище, – без впливу на частинки повітряного потоку. Відмінність полягатиме лише в тому, що постійні інтегрування будуть визначатися за швидкістю і положенням частинки після отримання імпульсу в точці B . Зробимо перерахунок відповідних постійних інтегрування і на цій основі скорегуємо кінцеві закономірності. Початкове рівняння для розрахунку постійної інтегрування горизонтальної проекції швидкості частинки і граничні умови для нього такі:

$$-\frac{1}{v_x} = -\frac{0,424}{\rho_0 d} \cdot t + C.$$

При $t = 0$, $v_x = v_{Bux}$. Звідки $C = -\frac{1}{v_{Bux}}$.

$$v_x = \frac{v_{Bux} \cdot \rho_0 d}{0,424 \cdot v_{Bux} \cdot t + \rho_0 d}. \quad (15)$$

Початкове рівняння для розрахунку постійної інтегрування горизонтальної проекції швидкості частинки і граничні умови для нього приймуть вигляд:

$$x = 2,358 \cdot \rho_0 d \cdot \ln \left(\frac{0,424 \cdot v_{Bux} \cdot t + \rho_0 d}{\rho_0 d} \right) + C.$$

При $t = 0$, $x = x_B$. Звідки $C = x_B$.

Таким чином, закон руху частинки вздовж горизонтальної осі координат на другому етапі польоту після імпульсної дії струменя набуде вигляду:

$$x = 2,358 \cdot \rho_0 d \cdot \ln \left(\frac{0,424 \cdot v_{Bux} \cdot t + \rho_0 d}{\rho_0 d} \right) + x_B. \quad (16)$$

Нижче представлено вихідне рівняння для розрахунку постійної інтегрування вертикальної проекції швидкості частинки і граничні умови для нього.

$$1,536 \cdot \sqrt{\frac{\rho_0 d}{g}} \cdot \arctan \left(\frac{0,651 \cdot v_y}{\sqrt{g \rho_0 d}} \right) = -t + C. \quad (17)$$

При $t = 0$, $v_y = v_{Buy}$. Звідки $C = 1,536 \cdot \sqrt{\frac{\rho_0 d}{g}} \cdot \arctan \left(\frac{0,651 \cdot v_{Buy}}{\sqrt{g \rho_0 d}} \right)$.

З рівняння (17) знаходимо закон зміни швидкості на другому етапі польоту частинки:

$$v_y = \frac{\sqrt{g \rho_0 d}}{0,651} \cdot \tan \left(\frac{C - t}{1,536 \cdot \sqrt{\frac{\rho_0 d}{g}}} \right).$$

Після підстановки знайденого значення постійної інтегрування отримаємо:

$$v_y = \frac{\sqrt{g \rho_0 d}}{0,651} \cdot \tan \left[\arctan \left(\frac{0,651 \cdot v_{Buy}}{\sqrt{g \rho_0 d}} \right) - \frac{t}{1,536 \cdot \sqrt{\frac{\rho_0 d}{g}}} \right]. \quad (18)$$

Початкове рівняння для розрахунку постійної інтегрування вертикальної проекції швидкості частинки і граничні умови для нього матимуть вигляд:

$$y = -1,18 \rho_0 d \cdot \ln \left[1 + \tan \left(\frac{0,651 \cdot v_{Buy}}{\sqrt{g \rho_0 d}} - \frac{0,651 \cdot t}{\sqrt{\frac{\rho_0 d}{g}}} \right)^2 \right] + C.$$

При $t = 0$, $y = y_B$. Звідки $C = 1,18 \rho_0 d \cdot \ln \left[1 + \tan \left(\frac{0,651 \cdot v_{Buy}}{\sqrt{g \rho_0 d}} \right)^2 \right] + y_B$.

Таким чином, закон руху частинки вздовж вертикальної осі координат на другому етапі польоту після імпульсної дії струменя набуде вигляду:

$$y = -1,18 \rho_0 d \cdot \ln \left[1 + \tan \left(\frac{0,651 \cdot v_{Buy}}{\sqrt{g \rho_0 d}} - \frac{0,651 \cdot t}{\sqrt{\frac{\rho_0 d}{g}}} \right)^2 \right] + 1,18 \rho_0 d \cdot \ln \left[1 + \tan \left(\frac{0,651 \cdot v_{Buy}}{\sqrt{g \rho_0 d}} \right)^2 \right] + y_B. \quad (19)$$

Законом руху частинки з урахуванням обох етапів руху (до потрапляння на струмінь і пі-

сля здуву струменем) є сукупність виразів (6), (9), (16) і (19). Перехід з одного етапу в інший відбувається в точці з координатами (14). Кінцеві параметри першого етапу є початковими для другого (13). Цільовою функцією дослідження є вибір таких конструктивних умов, при яких горизонтальні відстані між частинками різних розмірів (різниця відповідних координат) на встановленому горизонті будуть максимальними і достатніми для сортування частинок за їх розмірами. У зв'язку з різноманіттям технологічних можливостей конкретного виробництва, цільову функцію нескладно знаходити за допомогою візуалізації в програмному середовищі MathCAD. При цьому користувач програми задає потрібні йому початкові умови і в результаті отримує зрозумілі йому наочно представлені кінцеві результати руху віяла частинок різного розміру (попередньо задається користувачем програми).

Результат візуалізації одного з віртуальних експериментів з набором конструктивних параметрів показаний на рис. 4.

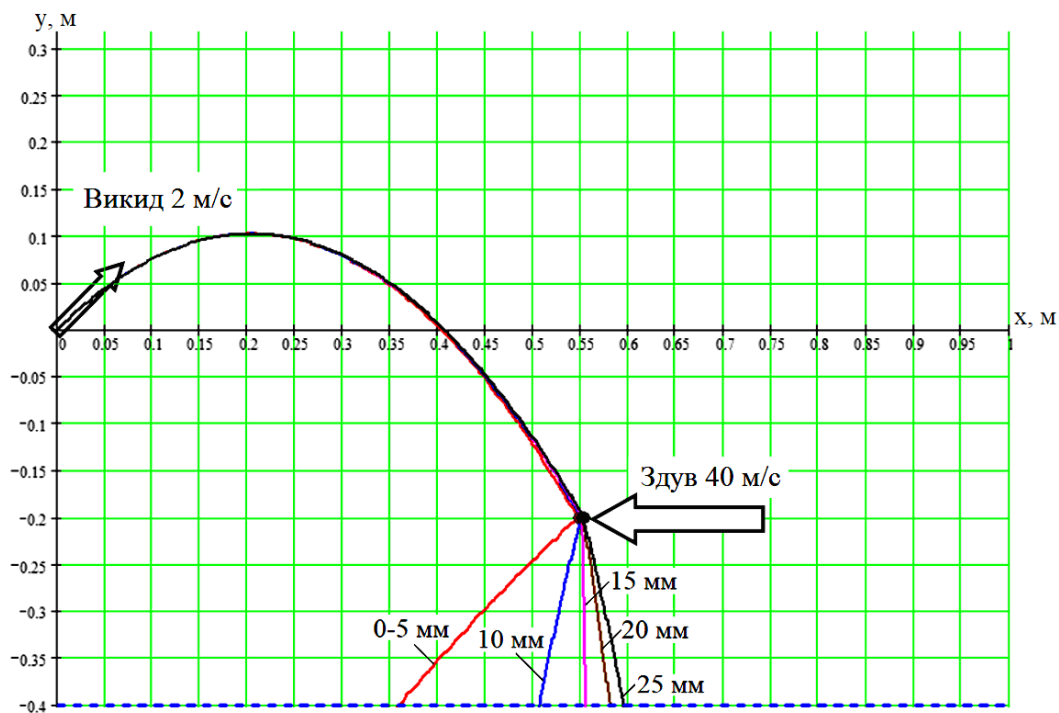


Рис. 4 – Траєкторії розльоту одношарового потоку окатишів різної крупності при їх здуві плоским струменем повітря (шкала розмірів в метрах). Швидкість струменя 40 м/с. Кут вильоту потоку окатишів до горизонту 45° , а його початкова швидкість 2 м/с

У віртуальному експерименті товщина повітряного потоку в зоні попадання на одношаровий потік обпалених окатишів різного діаметру прийнята 150 мм. Для розрахунку використана наступна градація діаметрів окатишів 0-5 мм; 10 мм; 15 мм; 20 мм і 25 мм.

Висновки

Проведені аналітичні дослідження показують реальну можливість класифікації обпалених окатишів повітряним потоком з відділенням необхідних крупності і кількості фракцій при їх вивантаженні зі стрічкового конвеєра під певним кутом і з певною швидкістю вильоту окатишів.

Перелік використаних джерел:

1. Кокорин Л.К. Производство окисленных окатышей. Технология. Оборудование / Л.К. Кокорин, С.Н. Лелеко. – Екатеринбург : Марат. – 2004. – 280 с.
2. Теория и технология подготовки шихтовых материалов для доменной и бездоменной ме-

- таллургии железа : учебник / Ф.М. Журавлев, В.П. Лялюк, Н.И. Ступник, В.С. Моркун, Е.В. Чупринов, Д.А. Кассим. – Кривой Рог : Издатель Чернявский Д.А., 2020. – 663 с.
3. Дурнов В.К. Воздушная классификация агломерата и окатышей / В.К. Дурнов, Н.М. Бабушкин, А.М. Штейнберг // Сталь. – 1981. – № 5. – С. 6-8.

References:

1. Kokorin L.K., Leleko S.N. *Proizvodstvo oksislennykh okatyshej. Tekhnologiya. Oborudovanie* [Production of oxidized pellets. Technology. Equipment]. Ekaterinburg, Marat Publ., 2004. 280 p. (Rus.)
2. Zhuravlev F.M., Lyalyuk V.P., Stupnik N.I., Morkun V.S., Chuprinov E.V., Kassim D.A. *Teoriya i tekhnologiya podgotovki shikhtovykh materialov dlya domennoy i bezdomennoy metallurgii zheleza: uchebnyy* [Theory and technology of preparation of charge materials for blast-furnace and blast-furnace metallurgy of iron: textbook]. Krivoy Rog, Izdatel Chernyavskiy D.A. Publ., 2020. 663 p. (Rus.)
3. Durnov V.K., Babushkin N.M., Shtejnberg A.M. *Vozdushnaya klassifikatsiya aglomerata i okatyshej* [Air classification of sinter and pellets]. *Stal' – Steel*, 1981, no. 5, pp. 6-8. (Rus.)

Рецензент: О.Д. Учитель
д-р техн. наук, проф. ННТІ ДУЕТ

Стаття надійшла 15.04.2021

УДК 739.4

doi: 10.31498/2225-6733.42.2021.240578

© Аніщенко О.С.¹, Гущин А.В.², Кухар В.В.³, Присяжний А.Г.⁴

**ВРАХУВАННЯ ПРУЖИНЕННЯ ПРИ ХУДОЖНЬОМУ КУВАННІ
ВОЛЮТОПОДІБНИХ ЕЛЕМЕНТІВ**

Для волюти у вигляді спіралі Архімеда, яка умовно поділена на 5 ділянок, наведений алгоритм розрахунків збільшення радіусів та кутів гнуття кожної з ділянок. Розрахунки показують, що пружинення тим інтенсивніше, чим більше відношення радіусу гнуття до товщини для кожної ділянки волюти, вище міцнісні властивості сталей, їх схильність до зміцнення в процесі деформації. Значне пружинення фіксується, якщо радіуси гнуття та товщина відрізняються майже на порядок.

Ключові слова: пружинення, волюта, радіус гнуття, кут гнуття, степенева функція.

O.S. Anishchenko, A.V. Hushchyn, V.V. Kukhar, A.G. Prysiazhnyi. Taking into account springing in art forging of volute products. The article shows that bending of volutes consists of two stages. At the stage of loading there is an elastic and plastic deformation of the workpiece. Elastic deformation is described by a linear function (Hooke's law), plastic deformation is described by an exponential function of strain stress in the workpiece. In the second stage of bending a partial restoration of the original shape of the workpiece takes place. For a volute in the form of an Archimedes spiral, which is conditionally divided into 5 sections, an algorithm for calculating the increase in radii

¹ канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, aas540628@gmail.com

² студент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, titan482@gmail.com

³ д-р техн. наук, професор, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, [ORCID: 0000-0002-4863-7233, kvv.mariupol@gmail.com](mailto:ORCID:0000-0002-4863-7233,kvv.mariupol@gmail.com)

⁴ канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, [ORCID: 0000-0001-8062-075X, agr87514@gmail.com](mailto:ORCID:0000-0001-8062-075X,agr87514@gmail.com)

and bending angles of each section has been given. Calculations show that the springing is more intense, the greater is the ratio of bending radius to thickness for each section of the volute, and the higher is the strength properties of steels, as well as their tendency to harden during deformation, which is determined by the coefficients of an exponential function. Even small additions of silicon, in 09Г2С and 09Г2 steels, increase the strength of the first steel and its springing when bending all parts of the volute. For 08Х22Н6Т stainless steel the increase in a bending radius is 3,5-4 times more, than for other steels. In addition, the bending force increases significantly. Therefore, volutes from steel 08Х22Н6Т are not made in a cold condition as a rule. Significant springing occurs when the bending radii and thickness differ by almost an order of magnitude. The results of the calculations were experimentally verified on 08Х22Н6Т and 10 steel billets with a square side in the cross section of 2, 4 and 8 mm. The graphs show that the relative springing of the workpieces made of 08Х22Н6Т steel is higher than that of steel 10 for sections of the volute with a minimum bending radius of 1.5-2 times, with a maximum bending radius of 2.3-2.6 times. In general, the springing calculations correspond to the experimental results, the error does not exceed 16%.

Keywords: springing, volute, bending radius, bending angle, exponential function.

Постановка проблеми. Кування – найдревніша технічна професія в історії людства, вона вважається священною у всіх світових релігіях. Навіть боги (Гефест, Вулкан, Сварог...) були ковалями, а родоначальником ковальської технології у людей був Тувалкаїн, «...ковач всіх знарядь з міді та заліза» (Буття, 4:22).

Здавна ковальські вироби вважалися художніми витворами мистецтва [1, 2], якими прикрашали домівку, одяг, інструменти та ін. Найбільш поширеними декоративними елементами в художньому куванні були волюти [3] – спіралевидні завитки з кружечком в центрі (рис. 1). Волюти і наразі застаються головними елементами для прикрас в решітках, огорожах, воротах, світильниках і т. ін., виготовлених як в класичному стилі, так і в стилях ампір, модерн, рококо, бароко [4, 5].

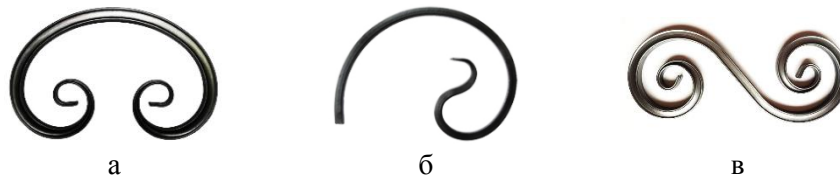


Рис. 1 – Волюти (а, в) та волютоподібні вироби (б)

Важливою задачею при вільному куванні волюти є отримання правильної спіральної форми, якому заважає пружинення заготовки при гнутті [6, 7].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Метою досліджень пружинення при гнутті заготовки є його усунення або врахування за рахунок вдосконалення технології і інструменту (шаблонів, кондукторів тощо). Волюти виготовляють з нагрівом металу і нахолодно. Якщо волюти призначені для прикрас або потрібно виготовляти значну їх кількість, потрібен шаблон (рис. 2), в контури якого повинні вписуватися кожен оборот спіралі і товщина заготовки, призначеної для виготовлення спіралі. Формоутворююча поверхня шаблону повинна мати кривизну, відмінну від кривизни заготовки, що згинається, на величину пружинення [3]. Отже саме на цю величину кут загину в шаблоні повинен бути більше, ніж заданий.

Відомі роботи, в яких: 1) пружинення усували гнуттям спіралей з протитиском [8] або з використанням протитискної подушки [9]; 2) розміри деталей, що пружинять при гнутті, виправляють термомеханічною обробкою, суміщеною з гнуттям [10]; 3) враховують пружинення превентивними розрахунками розмірів деталей за переходами при багатопереходному гнутті листів [11], гнутті з подвійним вигином [12], ротаційному гнутті листів [13], вигину товстолистових заготовок з важкодеформівного матеріалу [14]. Замість трудомістких експериментів інтенсивно впроваджуються числові методи розрахунків [9, 12] та комп'ютерне моделювання [8, 9].



Рис. 2 – Ковадло та шаблони для художнього кування

Проте в роботі [15] показано, що більшість теорій пружинення при гнутті використовують лінійні залежності між геометричними параметрами заготовок та кутом пружинення, хоча для більш повної картини при прогнозуванні пружинення потрібні нелінійні залежності, окремо для малих і великих кутів гнуття. Числові програмні методи мають істотні обмеження. Або метод можна застосовувати для чисельного розрахунку в області пружних або пружно-пластичних деформацій, або – для чисельного розрахунку в області пластичних деформацій, що обмежує можливість чисельного розрахунку пружинення при малих кутах, де присутні всі три області.

Мета статті – знаходження кривизни і кута загину, на які необхідно провести гнуття заготовки, з тим, щоб отримати їх значення після пружинення, що дорівнюють заданим.

Виклад основного матеріалу. Дослідження виконували на заготовках зі стороною квадрата в перерізі $h = 2; 4; 8; 12$ мм, які вирізали з гарячекатаних листів зі сталей 09Г2, 09Г2С, зі сталі 10 після нормалізації, а також з гарячекатаних та загартованих листів сталі 08Х26Н6Т. Волюти згинали нахолодно у вигляді спіралі Архімеда. Перед гнуттям поверхню заготовок обробляли до шорсткості $Ra 2,5$.

Радіуси гнуття вимірювали радіусометром Vogel, кути гнуття – гоніометром СГ-ІЦ з похибками відповідно $\pm 0,02$ мм і 1° . Хімічний склад і механічні властивості листів наведені в таблиці 1 і відповідають заводським сертифікатам.

Таблиця 1

Хімічні та механічні властивості прокату, що використовується

Марка сталі	Хімічний склад, % за масою									Механічні властивості			
	C	Si	Mn	S	P	Cu	Cr	Ni	Ti	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	ϵ_B , %	E, МПа
09Г2	0,09	0,26	1,65	0,030	0,028	-	-	-	-	305	440	21	$2,1 \cdot 10^5$
09Г2С	0,10	0,64	1,62	0,032	0,029	-	-	-	-	325	470	21	$2,1 \cdot 10^5$
10	0,11	0,31	0,43	0,036	0,031	-	-	-	-	205	330	31	$2,0 \cdot 10^5$
08Х26Н6Т	0,07	0,69	0,73	0,022	0,028	0,28	21,8	5,6	0,62	340	590	20	$1,98 \cdot 10^5$

Гнуття заготовки у волютоподібну форму складається з двох стадій. На стадії навантаження відбувається пружно-пластичне формозмінення заготовки. Пружна деформація описується лінійною функцією (законом Гука):

$$\sigma = E\varepsilon, \tag{1}$$

пластична деформація – степеневою функцією напруження в заготовці σ від деформації ε :

$$\sigma = k\varepsilon^n, \tag{2}$$

де E – модуль пружності матеріалу; k – модуль зміцнення; n – показник деформаційного зміцнення матеріалу заготовки.

Пластична деформація, крім пружної, з'являється, коли заготовка при гнутті досягає ступеню деформації ε_{pp} , який розраховується за формулою:

$$\varepsilon_{pp} = (k/E)^{1/1-n}. \tag{3}$$

На другій стадії гнуття відбувається часткове відновлення вихідної форми заготовки. Зазвичай, при виготовленні волют заготовки вигинають на велику кривизну, тому згідно з [6] замість закону Гука доцільно використовувати при розрахунках степеневу функцію. Параметри k і n можна визначити формулами:

$$n = \frac{\ln(\sigma_B/\sigma_{0,2})}{\ln(\varepsilon_B/\varepsilon_{0,2})}, \quad k = \frac{\sigma_B}{\varepsilon_B^n}.$$

Значення параметрів формул (1-3) наведені в таблиці 2.

Таблиця 2

Параметри апроксимації деформації зразків степеневою функцією (2)

Марка сталі	Параметри		
	k	n	ε_{pp}
Сталь 10	404,5	0,174	$5,47 \cdot 10^{-4}$
09Г2	561,2	0,157	$8,87 \cdot 10^{-4}$
09Г2С	650,4	0,156	$1,06 \cdot 10^{-3}$
08Х22Н6Т	2464,7	0,239	$3,14 \cdot 10^{-3}$

Розглянемо формоутворення волюти, яка закручена зі змінним радіусом кривизни з прутка, квадратний перетин якого має сторону h . Формули, що визначають зміну кривизни i -тої ділянки волюти V_i^{pp} внаслідок пружинення і її значення W_i , яке залишилося після розвантаження, приймуть такий вигляд (для перетину з двома осями симетрії):

$$V_i^{pp} = V_i[v^3 + (1 - v^{n+2})\beta(hV_i)^{n-1}];$$

$$W_i = V_i\{1 - [v^3 + (1 - v^{n+2})\beta(hV_i)^{n-1}]\},$$
(4)

де V_i – кривизна зігнутого елемента прутка відносно нейтрального шару деформації; $v = \frac{2}{hV_i} \left(\frac{k}{E}\right)^{1/1-n}$ – коефіцієнт, що характеризує відносну величину пружної зони по висоті перетину; $\beta = \frac{6k}{E2^{n(n+2)}}$ – сталий для кожного металу коефіцієнт, який визначається через його механічні властивості; $\beta \cdot 10^3 = 6,67, 7,85, 4,95, 28$ для сталей 09Г2, 09Г2С, 10 і 08Х22Н6Т.

Якщо ввести у формули (4) відносний радіус кривизни r_i^p :

$$r_i^p = R_i^p/h = 1/hV_i,$$
(5)

де R_i^p – радіус кривизни центрального шару зігнутого елемента, то формула для розрахунків відносної кривизни $w_i^p = W_i/V_i$ будемо мати вигляд:

$$w_i^p = \frac{r_i^p}{1 - [v^3 + (1 - v^{n+2})\beta(r_i^p)^{n-1}]}.$$
(6)

Як правило, контур волюти визначається або логарифмічною, або спіраллю Архімеда. Наприклад, для другого випадку, якщо треба збудувати шаблон для виготовлення волюти зі сталі 09Г2С, останню спочатку поділяють на 5 ділянок [7] (рис. 3).

Хай буде для першої ділянки $R_1^p = 13$ мм. Тоді $r_1^p = R_1^p/h = 13/12 = 1,083$. Дві залежності (1-2) визначають, що перехід лінійної залежності в степеневу відбувається при відносній деформації ε_{pp} :

$$\varepsilon_{pp} = \left(\frac{660,4}{2,1 \cdot 10^5}\right)^{1/1-0,156} = 1,08 \cdot 10^{-3}.$$
(7)

Далі обчислюємо v , β і w_1^p :

$$v = \frac{2 \cdot 0,00108}{12 \cdot 1/13} = 0,00234; \quad \beta = \frac{6 \cdot 660,4}{2,1 \cdot 10^5 \cdot 2^{0,156(0,156+2)}} = 0,00785;$$

$$w_1^p = \frac{1,083}{1 - [0,00234^3 + (1 - 0,00234^{0,156+2}) \cdot 0,00785 \cdot 1,083^{1-0,156}]} = 1,092.$$

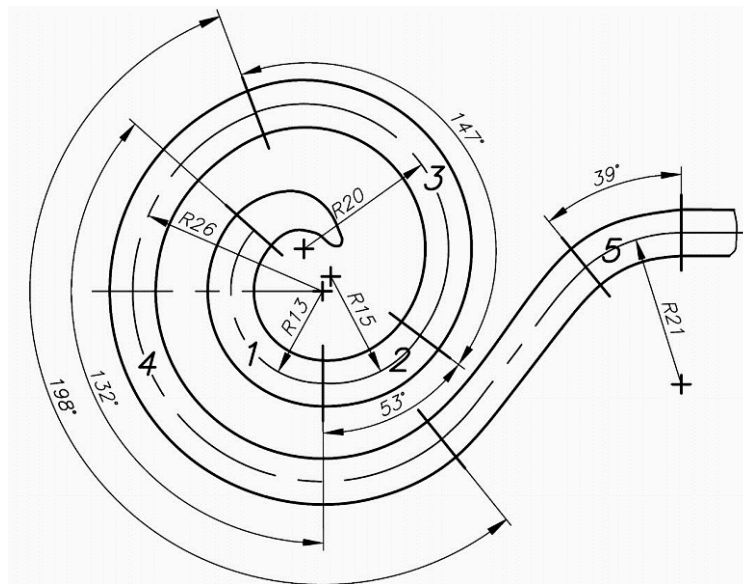


Рис. 3 – Схема умовного поділення волоти на ділянки

Отже при гнутті внаслідок пружинення параметр R_1^p для першої ділянки волоти збільшиться до $R_1^{pp} = hw_1^p = 13,11$ мм, тобто збільшення радіусу кривизни складе:

$$z = R_1^{pp} - R_1^p = 13,11 - 13 = 0,11 \text{ мм.}$$

Вважаючи, що зміна кута гнуття волоти θ_i пропорційна зміні радіусу гнуття внаслідок пружинення, отримуємо для кута гнуття першої ділянки волоти $\theta_1 = 132^\circ$ його фактичне значення:

$$\theta_1^\phi = \theta_1 \cdot R_1^p / R_1^{pp} = 132 \cdot 13 / 13,11 = 130,89^\circ.$$

Для того, щоб при гнутті волоти отримати необхідне значення кута $\theta_1 = 132^\circ$, заготовку потрібно згинати на кут θ_1^p , що дорівнює:

$$\theta_1^p = \frac{\theta_1}{\theta_1^\phi / \theta_1} = \frac{132}{130,89 / 132} = 133,12^\circ,$$

тобто більший ніж θ_1 , на величину:

$$f = \theta_1^p - \theta_1 = \theta_1^p - \theta_1 = 133,12 - 132 = 1,12^\circ,$$

де i – номер ділянки волоти.

Аналогічні розрахунки були виконані для всіх ділянок волот (рис. 3), що були зігнуті із заготовок ($h = 12$ мм) чотирьох марок сталей (табл. 1). На рис. 4-5 представлені діаграми, які показують вплив пружинення на параметри збільшення z і f радіусів та потрібних кутів кривизни при виготовленні волот. Графіки показують, що пружинення тим інтенсивніше, чим більше співвідношення R_i^p/h для кожної ділянки волоти, вище міцнісні властивості сталей, їх схильність до зміцнення в процесі деформації, яка визначається параметрами n і k . Навіть незначні добавки кремнію, що відрізняють сталі 09Г2С і 09Г2, збільшують показники міцності першої сталі та її пружинення при гнутті всіх ділянок волоти. Для нержавіючої сталі 08Х22Н6Т параметр z в 3,5-4 рази більший, ніж для інших сталей, до того ж суттєво зростає зусилля гнуття. Тому в холодному стані волоти зі сталі 08Х22Н6Т, як правило, не виготовляють.

Хоча діаграми мають дещо різний вигляд, але значення z і f відносно радіуса кривизни і кута кожної ділянки знаходяться між собою в пропорційних залежностях. Ці значення мінімальні для першої і максимальні для четвертої ділянки волоти. В зв'язку з цим для цих ділянок волоти були розраховані відносні зміни Q радіусів кривизни внаслідок пружинення:

$$Q = (R_i^{pp} - R_i^p) / R_i^p \cdot 100 \%,$$

де R_i^{pp} – радіус кривизни центрального шару зігнутого елемента після пружинення.

Результати розрахунків були експериментально перевірені на заготовках зі сталей 10 та 08Х22Н6Т зі стороною квадрата в перерізі 2, 4 і 8 мм (рис. 6). Графіки показують, що відносне

пружинення Q заготовок зі сталі 08Х22Н6Т вище, ніж зі сталі 10 для першої ділянки волоти в 1,5-2 рази, для четвертої – в 2,3-2,6 рази. В цілому розрахунки пружинення відповідають експериментальним результатам, похибка у визначенні параметра Q не перевищує 16%.

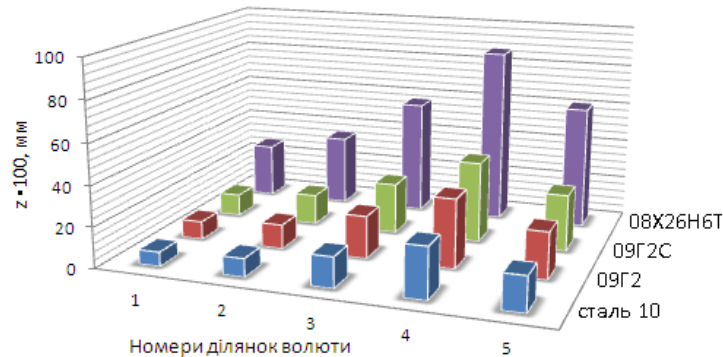


Рис. 4 – Збільшення радіусів кривизни на п'ятьох ділянках волот внаслідок пружинення при гнутті заготовок з різних марок сталей

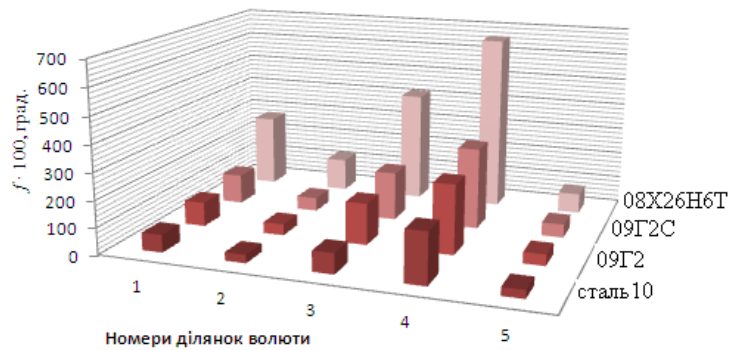


Рис. 5 – Збільшення кута θ , при гнутті ділянок волоти, яке потрібне для забезпечення його значень на рис. 3 після пружинення

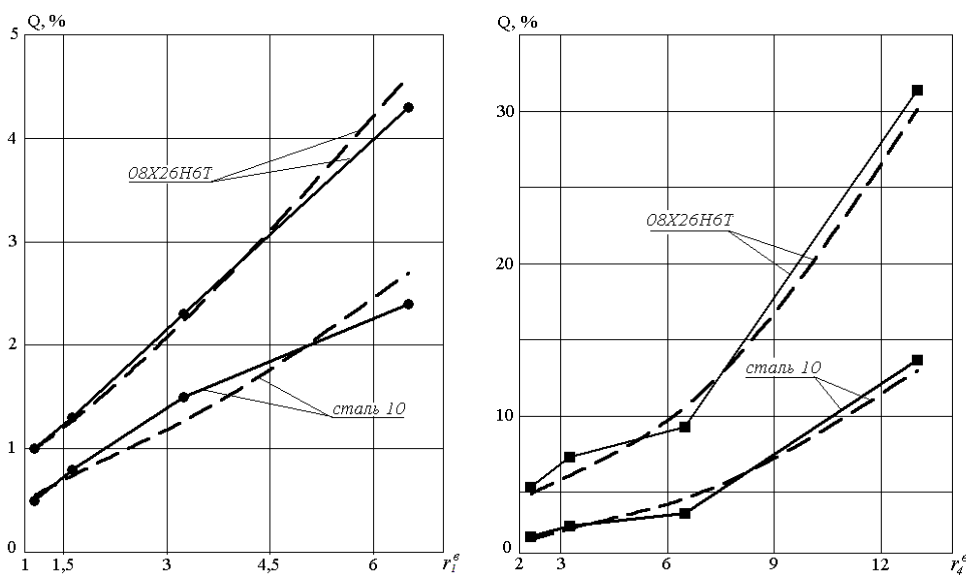


Рис. 6 – Вплив відносного радіуса волоти на відносне пружинення заготовок: ліворуч – для ділянки 1; праворуч – для ділянки 4; суцільні лінії – експериментальні дані, штрихові лінії – розрахункові дані

Якщо припустимо пружинення з параметром $Q = 10\%$, то його слід враховувати при гнутті заготовок з $R_i^p/h \geq 10$ і 7 відповідно для сталі 10 і 08X26H6T. Збільшення Q до 20% призводить до того, що пружинення враховується тільки для заготовок зі сталі 08X26H6T з $R_i^p/h \geq 10$.

Результати роботи були використані при виготовленні шаблонів і художньому куванні виробів (рис. 7), які були відзначені нагородами на ковальфестах в Маріуполі, Бердянську і Рівне.



«Чумацький шлях»

«Азовська креветка»

Мангальний набір

Рис. 7 – Експонати художнього кування з волютоподібними елементами (автор – А.В. Гуцин)

Висновки

Пружинення заготовок при гнутті волют можна розрахувати з похибкою не більш 16% на основі степеневих функцій напруження від деформації для сталей, що використовуються, та співвідношень між радіусами кривизни нейтрального шару ділянок волоти та товщиною заготовки. Значне пружинення фіксується, якщо останні параметри відрізняються майже на порядок.

Перелік використаних джерел:

1. Light J.D. Observations concerning the hand forging of wrought iron / J.D. Light // *Materials Characterization*. – 2000. – Vol. 45. – Pp. 327-340.
2. Sherby O.D. Ancient blacksmiths the Iron Age, Damascus steels and modern metallurgy / O.D. Sherby, J. Wadsworth // *Materials Processing Technology*. – 2001. – Vol. 117. – Pp. 347-355.
3. Богман К. Художественная ковка и слесарное искусство / К. Богман, Г. Семерак. – М. : Книга по требованию, 2016. – 231 с.
4. Cast iron street furniture: A historical review / C. Soffritti [et al.] // *Endeavour*. – 2020. – Vol. 44, iss. 3. – Pp. 1-15. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.endeavour.2020.100721>.
5. Swenson E.R. Crucibles of power: Forging copper and forging subjects at the Moche / E.R. Swenson, J.P. Warner // *Journal of Anthropological Archaeology*. – 2012. – Vol. 31. – Pp. 314-333. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.jaa.2012.01.010>.
6. Лысов М.И. Формообразование деталей гибкой / М.И. Лысов, Н.В. Сосов. – М. : Машиностроение, 2001. – 388 с.
7. Филиппов Д.И. Инженерная теория расчета геометрических и силовых параметров изготовления гнутых элементов художественной ковки / Д.И. Филиппов, Ю.А. Морозов // Молодежный научный форум: технические и математические науки. – 2014. – № 11 (18). – С. 71-79.
8. Lee S.-I. Mg Scroll Forging with AZ80 under Warm Forming Condition / S.-I. Lee, J. Yoon, J. Lee // *International journal of precision engineering and manufacturing*. – 2014. – Vol. 15, no. 7. – Pp. 1473-1477. – Mode of access: <https://doi.org/10.1007/s12541-014-0493-8>.
9. Phanitwonga W. FE-analysis of channel width effects on spring-back characteristics in the U-bending process / W. Phanitwonga, S. Thipprakmasa // *Procedia Engineering*. – 2017. – Vol. 183. – Pp. 17-22. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.005>.

10. Sajan M. A novel method for the spring-back analysis of a hot stamping steel / M. Sajan, M. Amirthalingam, U. Chakkingal // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2021. – Vol. 11. – Pp. 227-234. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.01.017>.
11. Kukhar V. Spring-back effect during multi-pass bending of sheet blanks / V. Kukhar, M. Nahnibeda, O. Radushev // *E3S Web of Conferences*. – 2019. – Pp. 1-9. – Mode of access: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201913501066>.
12. Investigating spring back phenomena in double curved sheet metals forming / M.H. Parsa, S.N. Al-ahkami, H. Pishbin, M. Kazemi // *Materials and Design*. – 2012. – Vol. 41. – Pp. 326-337. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.05.009>.
13. Анищенко А.С. Изготовление цилиндрических обечаек на ротационных листогибочных машинах / А.С. Анищенко // *Захист металургійних машин від поломок* : Зб. наук. пр. – 2014. – № 16. – С. 79-86.
14. Адаптація технології гнуття товстолистової заготовки з важкодеформівного матеріалу до параметрів пресового устаткування / Г.В. Артюх, В.В. Кухар, О.В. Грушко, Т.І. Молодецька // *Захист металургійних машин від поломок* : Зб. наук. пр. – 2012. – № 14. – С. 110-116.
15. Сапрыкин Б.Ю. Анализ способов расчета пружинения листовых материалов / Б.Ю. Сапрыкин // *Известия МГТУ «МАМИ»*. – 2013. – № 2 (16), т. 2. – С.133-139.

References:

1. Light J.D. Observations concerning the hand forging of wrought iron. *Materials Characterization*, 2000, iss. 45, pp. 327-340.
2. Sherby O.D. Wadsworth J. Ancient blacksmiths the Iron Age, Damascus steels and modern metallurgy. *Materials Processing Technology*, 2001, iss. 117, pp. 347-355.
3. Bogman K., Semerak G. *Khudozhestvennyya kovka i slesarnoe iskusstvo* [Artistic forging and metalwork]. Moscow, Kniga po trebovaniyu Publ., 2016. 231 p. (Rus.)
4. Soffritti C., Calzolari L., Chicca M., Bassi Neri R., Neri A., Bazzocchi L., Garagnani G.L. Cast iron street furniture: A historical review. *Endeavour*, 2020, vol. 44, iss. 3, pp. 1-15. doi: **10.1016/j.endeavour.2020.100721**.
5. Swenson E.R. Warner J. P. Crucibles of power: Forging copper and forging subjects at the Moche. *Journal of Anthropological Archaeology*, 2012, iss. 31, pp. 314-333. doi: **10.1016/j.jaa.2012.01.010**.
6. Lysov M.I., Sosov N.V. *Formoobrazovaniye detaley gibkoy* [Shaping of flexible parts]. Moscow, Mashinostroeniye Publ., 2001. 388 p. (Rus.)
7. Filippov D.I., Morozov Yu.A. Inzhenernaya teoriya rascheta geometricheskikh i silovykh parametrov izgotovleniya gnutykh elementov khudozhestvennoy kovky [Engineering theory of calculating the geometric and power parameters of the manufacture of bent elements of artistic forging]. *Molodezhnyi nauchnyi forum: tekhnicheskkiye i matematicheskkiye nauky – Youth Science Forum: Engineering and Mathematical Sciences*, 2014, no. 11 (18), pp. 71-79 (Rus.)
8. Lee S.-I. Yoon J., Lee J. Mg Scroll Forging with AZ80 under Warm Forming Condition. *International journal of precision engineering and manufacturing*, 2014, iss. 15, no. 7, pp. 1473-1477. doi: **10.1007/s12541-014-0493-8**.
9. Phanitwong W., Thipprakmasa S. FE-analysis of channel width effects on spring-back characteristics in the U-bending process. *Procedia Engineering*, 2017, vol. 15, no. 7, pp. 1473-1477. doi: **10.1007/s12541-014-0493-8**.
10. Sajan M. Amirthalingam M., Chakkingal U. A novel method for the spring-back analysis of a hot stamping steel. *Journal of Materials Research and Technology*, 2021, vol. 11, pp. 227-234. doi: **10.1016/j.jmrt.2021.01.017**.
11. Kukhar V. Nahnibeda M., Radushev O. Spring-back effect during multi-pass bending of sheet blanks. *E3S Web of Conferences*, 2019, pp. 1-9. doi: **10.1051/e3sconf/201913501066**.
12. Parsa M.H., Al-ahkami S.N., Pishbin H., Kazemi M. Investigating spring back phenomena in double curved sheet metals forming. *Materials and Design*, 2012, iss. 41, pp. 326-337. doi: **10.1016/j.matdes.2012.05.009**.
13. Anishchenko A.S. Izgotovlenie tsilindricheskykh obechayek na rotatsionnykh listogibochnykh mashinakh [Production of cylindrical shells on rotary plate bending machines]. *Zakhyst*

- metallurgiykh mashin vsd polomok – Protection of metallurgical machines from breakdowns*, 2014, no. 16, pp. 79-86. (Rus.)
14. Artiukh G.V., Kukhar V.V., Grushko O.V., Molodetska T.I. Adaptatsiia tekhnologii gnuttia tovtolistovoї zagotovki z vazhkodeformivnogo materialu do parametriv presovogo ustatkuvannia [Adaptation of technology of bending of thick-sheet preparation from heavy-deformable material to parameters of the press equipment]. *Zakhyst metallurgiykh mashin vsd polomok – Protection of metallurgical machines from breakdowns*, 2012, no. 14, pp. 110-115. (Ukr.)
15. Saprykin B.Yu. Analiz sposobov rascheta pruzhynenya lyastovykh materialov [Analysis of methods for calculating the springing of sheet materials]. *Izvestiya MGTU «MAMI»*, 2013, vol. 2, no. 2 (16), pp. 133-139 (Rus.)

Рецензент: С.Л. Макуров
д-р техн. наук, проф., ДВНЗ «ПДТУ»

Стаття надійшла 30.04.2021

УДК 621.785:669.15-194.2

doi: 10.31498/2225-6733.42.2021.240582

© Ткаченко І.Ф.¹, Мірошніченко В.І.²

ПРОГНОЗУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОГО СТАНУ НЕРІВНОВАЖНИХ ТЕРМОДИНАМІЧНИХ СИСТЕМ В УМОВАХ ДЕГРАДАЦІЇ ЇХНЬОЇ ВНУТРІШНЬОЇ БУДОВИ ТА ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ

Розроблено теоретичний підхід до індивідуального прогнозування характеристик енергетичного стану термодинамічних систем (ТС) у нерівноважних умовах функціонування, що супроводжуються передбачуваною та випадковою деградацією їхньої внутрішньої будови та функціональних властивостей. Отримано аналітичні співвідношення задля розрахунку базових параметрів, що забезпечують ефективне функціонування ТС з урахуванням індивідуальних особливостей їхньої внутрішньої будови. Розроблений загальний підхід застосовано задля прогнозування інтервалу температур розвитку дислокаційної повзучості дисперсно-зміцненої сталі ASTM A316 промислового виробництва. Отримані результати та їхнє фундаментальне теоретичне підґрунтя засвідчують можливість використання розробленого підходу у різних сферах застосування: техніка, управління, економіка, медицина тощо.

Ключові слова: *термодинамічні системи, нерівноважні умови функціонування, передбачувана та випадкова деградація внутрішньої будови, прогнозування характеристик енергетичного стану.*

I.F. Tkachenko, V.I. Miroshnichenko. Prediction of an energy state for nonequilibrium thermodynamic systems under service conditions of their structure and performance degradation. *A general approach is developed to individual analytic prediction of an energy state indexes for thermodynamic systems (TS) working under the nonequilibrium service conditions that cause determined and random degradation of the TS structures and performance: losses nominal levels of structure components and service properties characteristics. The following TS were proposed to be considered as relevant ones for the analysis: heat-resistant alloys; technology processes; climate, ecology and biology systems. Based on the energy conservation law, analytic relations were obtained for the TS*

¹ д-р техн. наук, проф., Донецький національний медичний університет, м. Маріуполь, ift955@gmail.com

² канд. техн. наук, ст. викладач, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, [ORCID: 0000-0002-5956-7867](http://ORCID:0000-0002-5956-7867), miroshnichenko_v_i@pstu.edu

service parameters calculations to specify conditions for the TS maximum performance reaching based on the TS individual structure features and a random factor values. The values have to be used in the relations may be rigorously experimentally or theoretically specified for each TS. The approach developed in the work was applied to predict creep temperature interval for industrial, austenite, particle hardened ASTM A316 steel. The basic possible strengthening mechanisms in the steel were taking into account: dislocation gliding with the particles and forest dislocations overcoming together with typical for the steel type structural inhomogeneities existence: the particle free zones. Proceeding from the steel real structure features, the particle overcoming by mobile dislocations was concluded to be the dominant strengthening mechanism in the steel. Hence the steel starting creep temperature was calculated which value is in accordance with the known for the Fe based alloys minimal temperature of the dislocation climbing beginning. Based on the obtained results and their fundamental theoretical background, possibility is emphasized to apply the approach in science, technology control, medicine etc.

Keywords: *thermodynamic systems, nonequilibrium service conditions, determined and random degradation of the TS structures and performance, individual analytic prediction of an energy state indexes.*

Постановка проблеми. Нерівноважні системи охоплюють широкий клас термодинамічних систем (ТС), які містять велику кількість атомів чи молекул, що перебувають у межах певного об'єму під дією великих градієнтів внутрішніх та зовнішніх факторів: температури, механічних напружень, концентрацій складових хімічних елементів та ін. Вказані умови виникають, зокрема, у твердих тілах під час їх термічної обробки, дії експлуатаційних навантажень, а також в процесі життєдіяльності біологічних систем, в кліматології, екології тощо. Типовими прикладами промислових матеріалів, які відповідають наведеному визначенню, є високолеговані конструкційні корозійностійкі сталі та суперсплави, які працюють в умовах повзучості [1]. Головною вимогою до таких сплавів є збереження високої працездатності (сукупності експлуатаційних властивостей) в умовах впливу високих температур. Однією з найважливіших невирішених проблем стосовно цих сплавів є збереження їхніх номінальних (запланованих) міцносних властивостей за умов постійного впливу високих температур при експлуатації, наслідками чого є зміни характеристик мікроструктури (коалесценція та коагуляція частинок зміцнюючих фаз тощо) [1] та відповідна термічна деградація експлуатаційних властивостей. У загальному випадку зміни внутрішньої будови та властивостей ТС, обумовлені дією температури, вочевидь, слід розглядати як системні (керовані, передбачувані), інтенсивність яких залежить від особливостей внутрішньої будови ТС (номінального хімічного складу інженерних матеріалів, в цілому, та частинок зміцнюючих фаз, зокрема; швидкості розвитку дифузійних процесів; загального фізичного стану живого організму тощо).

У той же час добре відомо, зокрема, що значний вплив на стабільність структури та властивостей згаданих промислових сплавів має виникнення хімічних та структурних неоднорідностей (відповідних внутрішніх градієнтів) в умовах виробництва та ін. [2]. Подібні випадкові (непередбачувані) зміни внутрішньої будови та властивостей ТС, вочевидь, слід вважати некерованими. Вказані та інші чинники призводять до поступових втрат експлуатаційної ефективності (деградації внутрішньої будови та властивостей) відповідальних деталей з цих матеріалів під час їхньої експлуатації. Іншим прикладом важливості збереження стабільно високих показників функціонування ТС у нерівноважних умовах є стабілізація показників життєдіяльності багатоклітинних організмів, порушення якої обумовлено виникненням патологій різної етіології. Одним з різновидів згаданих патологій є інфекційні вірусні захворювання, боротьба з якими набуває все більшої актуальності в наш час.

У розглянутих вище умовах прогнозування індивідуального перебігу процесів дестабілізації внутрішньої будови та функціональних властивостей нерівноважних ТС на теперішній час не може бути здійснено безпосередньо на науково обґрунтованому об'єктивному кількісному рівні.

Мета роботи – розробити науково обґрунтований підхід до кількісного індивідуального прогнозування енергетичного стану ТС у нерівноважних умовах функціонування, що супроводжуються передбачуваною та випадковою деградацією внутрішньої будови та функціональних

властивостей ТС.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Стабілізація внутрішньої будови та прогнозування властивостей ТС з метою забезпечення високо ефективного їхнього функціонування у запланованих нерівноважних умовах протягом потрібного терміну є актуальною науково-технічною проблемою, що потребує науково обґрунтованого вирішення у різних галузях народного господарства: матеріалознавстві [1-3], управлінні технологічними процесами [4] та розвитком економіки [5], кліматології [6], медицині [7] та ін. Проте, на теперішній час вказану проблему вирішують у більшості випадків або на якісному суб'єктивному рівні [7], або з використанням недостатньо надійних експериментальних даних [2, 3] та шляхом застосування статистичних методів прогнозування загального перебігу певних перехідних процесів із подальшим розрахунком ймовірності різних кінцевих варіантів їхнього завершення [7].

Виклад основного матеріалу. Згідно одного з базових законів природи – закону збереження енергії (першого закону термодинаміки), для будь-якої (*i*-тої) ТС, яка має загальний запас енергії E_i , залежність роботи W_i , яку може виконати *i*-та ТС від температури T , має аналітичний вигляд:

$$W_i = E_i - TS_i, \quad (1)$$

де $S_i \approx \text{const}$ – є ентропія *i*-тої ТС; $T = Q/S_i$, де Q – кількість теплоти.

Такі залежності $W_i(T)$, що схематично зображені на рис. 1, вочевидь, є наслідком природних (керованих, передбачуваних) змін (термічної деградації) внутрішньої будови (втрати впорядкованої взаємоузгодженої поведінки атомів чи молекул) ТС із зростанням її температури. Ступінь вказаної термічної деградації (інтенсивності передбачуваних змін внутрішньої будови), як відомо, характеризує значення S_i , а саме: $S_i \rightarrow \infty$ відповідає високому потенціалу ТС щодо виконання роботи та інтенсивній термічній деградації *i*-тої ТС з підвищенням температури функціонування; $S_i \rightarrow 0$ відповідає вкрай низькій здатності (потенціалу) ТС виконувати роботу та низькій інтенсивності передбачуваного деградаційного впливу температури. За умов, що робочі температури ТС знаходяться у межах одного інтервалу $T_{\min} \dots T_{\max}$, для ентропії *i*-тої ТС можна записати:

$$S_i = (E_i - W_i^{\max})/T_{\min}, \quad (2)$$

де W_i^{\max} – максимальне значення W_i у робочому інтервалі температур за умов виключно керованих змін внутрішньої будови ТС. Слід підкреслити, що значення W_i^{\max} залежать від індивідуальних особливостей внутрішньої будови ТС, проте для ТС одного різновиду можуть змінюватись у межах: $0.. W_0^{\max}$, де W_0^{\max} – максимально можливе значення W_i^{\max} для ТС одного різновиду. Тобто характеристики W_0^{\max} та W_i^{\max} можна розглядати як, відповідно, потенційну максимальну роботу ТС та індивідуальну максимальну роботу ТС.

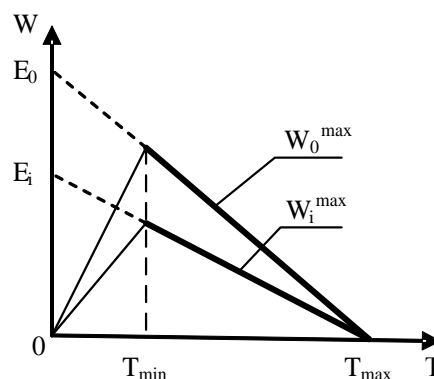


Рис. 1 – Схема температурних залежностей (передбачуваної термічної деградації внутрішньої будови) роботи ТС одного різновиду за різних особливостей їхньої внутрішньої будови (значень W_i^{\max} або S_i) в межах інтервалу температур функціонування $T_{\min} \dots T_{\max}$

Шляхом визначення обмежувальних значень W_i за температур T_{\min} та T_{\max} : W_i^{\max} та 0, відповідно, можна знайти $E_i = (W_i^{\max} / (T_{\max} - T_{\min})) \cdot T_{\max}$ індивідуально для кожної ТС. Треба підкреслити, що всі характеристики праворуч в цьому рівнянні може бути визначено експериментально для кожної конкретної (i -тої) ТС.

Як було зазначено вище, важливою особливістю функціонування будь-якої реальної ТС є можливість зменшень базової характеристики її стану E_i внаслідок одночасних дій керованих та випадкових змін внутрішньої будови ТС. Для певних різновидів ТС (жароміцні сплави; біологічні, екологічні, кліматичні та ін. системи) обов'язковим явищем є природна (передбачувана) деградація внутрішньої будови ТС в процесі її функціонування, яка обумовлена системними змінами характеристик компонентів внутрішньої будови ТС (коагуляція, коалесценція частинок зміцнюючих фаз твердих тіл, зменшення працездатності живих організмів з перевищенням власної оптимальної температури тощо). Окрім того, під час виробництва та функціонування вказаних вище ТС поширеним явищем є випадкові (непередбачувані) зміни їхньої внутрішньої будови: утворення хімічних та структурних неоднорідностей, відхилень фактичного хімічного складу компонентів структури твердих тіл від номінального; виникнення патологій у біологічних системах, катастрофічних явищ у кліматології та екології. Ці випадкові явища, додатково до передбачуваних, викликають погіршення здатності ТС виконувати потрібну роботу під час свого функціонування. Вочевидь випадкові (непередбачувані) зміни енергетичного становища i -тої ТС мають позначатись також на рівнях W_i за обмежувальних значень експлуатаційних температур.

В якості кількісної характеристики рівня вказаних випадкових зменшень здатності i -тої ТС до виконання роботи або незворотних втрат внутрішньої енергії E_i , обумовлених некерованими (непередбачуваними) змінами внутрішньої будови, будемо використовувати показник q . Значення q може бути визначено, у загальному випадку, декількома шляхами:

- усереднення окремих значень q , що отримано у декількох випадках експериментальних спостережень за аналогічними за своєю природою явищами випадкових змін внутрішньої будови реальних ТС;

- під час спеціально виконаних лабораторних досліджень відповідних явищ, які спостерігаються у реальних ТС;

- шляхом вибору домінуючого процесу серед тих, що мають послідовний розвиток та є наслідком альтернативних змін внутрішньої будови ТС.

Будемо також вважати, задля спрощення: $q(T) = \text{const}$. Тоді, враховуючи, що $S_i = \text{const}$, можемо записати: $E_i(q) = E_i - q$ та $W_i^{\max}(q) = W_i^{\max} - q$ (див. рис. 2) у межах всього інтервалу робочих температур $T_{\min} \dots T_{\max}$ за умов одночасного розвитку керованих та некерованих процесів деградації. Беручи до уваги, що T_{\max} , за визначенням, відповідає повній втраті здатності будь-якої ТС до виконання роботи (повна деградація внутрішньої будови та функціональних властивостей): $W_i(T_{\max}) = 0$ та, використовуючи підхід, застосований вище, задля визначення E_i , можна знайти формулу для розрахунків температури $T_i^{\max}(q)$, за досягнення якої, аналогічно до T_{\max} , буде отримано $W_i(q) = 0$ для ТС, що має випадкові зміни внутрішньої будови, які призводять до втрат внутрішньої енергії на рівні q :

$$T_i^{\max}(q) = T_{\max} \cdot (1 - q/E_i), \quad (3)$$

або

$$T_i^{\max}(q) = T_{\min} \cdot (E_i - q) / (E_i - W_i^{\max}).$$

З використанням цих формул можна визначити умови повної втрати здатності i -тої ТС до впорядкованого функціонування внаслідок повної термічної деградації її внутрішньої будови за наявності непередбачуваних (випадкових) змін такої будови, а саме: переходу у становище, коли i -та ТС буде мати повністю деградовану внутрішню будову за мінімальної температури функціонування даного різновиду ТС, тобто, $T_i^{\max}(q) \rightarrow T_{\min}$. Для таких умов треба записати: $q \rightarrow W_i^{\max}$ або $q \rightarrow E_i \cdot (1 - T_{\min}/T_{\max})$.

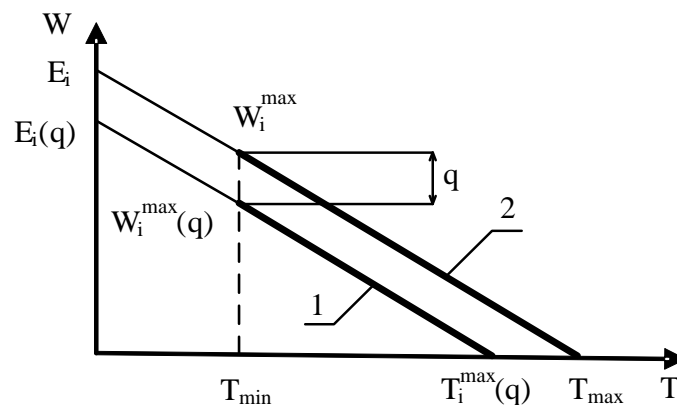


Рис. 2 – Схема температурних залежностей роботи (передбачуваної термічної деградації здатності до здійснення роботи) i -тої ТС певної внутрішньої будови за відсутності (залежність 1) та за наявності (залежність 2) випадкових (непередбачуваних) змін внутрішньої будови: q – втрати внутрішньої енергії ТС внаслідок випадкових змін її внутрішньої будови

Окрім того, можна також знайти співвідношення q та W_i^{\max} , за яких зниження максимально припустимої температури функціонування i -тої ТС (коли $W_i^{\max}(q) = 0$) не перевищуватиме прийняттого для такої ТС наперед наданого значення $\Delta T_i = T_{\max} - T_i^{\max}(q)$:

$$q/W_i^{\max} < 1 - (T_{\max}/\Delta T_{\max}) \cdot (\Delta T_{\max} - \Delta T_i)/(\Delta T_{\max} - \Delta T_i), \quad (4)$$

де $\Delta T_{\max} = T_{\max} - T_{\min}$.

Саме за такого ступеню випадкових змін внутрішньої будови i -тої ТС, який характеризується значенням q , ТС буде зберігати свою працездатність в необхідному інтервалі температур функціонування, тобто від T_{\min} до $(T_{\max} - \Delta T)$.

Важливе значення задля прогнозування працездатності будь-якої ТС в умовах одночасного розвитку процесів керованих та випадкових змін її внутрішньої будови та функціональних властивостей має визначення стану внутрішньої будови ТС або рівня W_i^{\max} , який має бути досягнуто за відсутності випадкових змін внутрішньої будови ТС (запас внутрішньої енергії за найбільш сприятливих умов її функціонування: $T = T_{\min}$) з метою мінімізації потенційно можливого впливу випадкових змін. Саме співвідношення значень $W_i^{\max}(q)$ (запасу внутрішньої енергії) для кожної ТС та очікуваного заздалегідь ступеню можливих випадкових змін цієї енергії q , обумовлених відповідними змінами внутрішньої будови, може забезпечити мінімально можливе зниження максимальної температури повної втрати працездатності відповідної ТС в умовах одночасного розвитку процесів передбачуваних та випадкових змін внутрішньої будови ТС. Відповідна формула має вигляд (див. рис. 1):

$$W_i^{\max}(q) \geq (E_0 - q)(W_0^{\max}/E_0), \quad (5)$$

де E_0 – максимально можливе значення E_i серед ТС одного різновиду; W_0^{\max} – потенційна максимальна робота ТС (максимально можливе значення W_i^{\max} ТС одного різновиду за відсутності випадкових змін її внутрішньої будови).

З формули (5) випливає, зокрема, що за очікуваного заздалегідь рівня можливих випадкових втрат внутрішньої енергії q , обумовлених випадковими процесами деградації внутрішньої будови певного різновиду ТС, інтервал температур функціонування, максимально наближений до номінальних температур виконання роботи i -тої ТС (від T_{\min} до T_{\max}), може бути досягнуто, якщо забезпечити для такої ТС, в умовах $T = T_{\min}$ та відомого очікуваного q , здатність виконувати роботу не меншу за $[W_i^{\max}(q)]_{\min} = (E_0 - q)(W_0^{\max}/E_0)$. Слід підкреслити, що задля вичерпної характеристики працездатності ТС за очікуваного рівня q слід також брати до уваги значен-

ня $T_i^{\max}(q)$, оскільки якщо $q \rightarrow E_0$, будемо мати: $T_i^{\max}(q) \rightarrow T_{\min}$. Враховуючи наведену вище залежність $E_i = E_i \cdot (W_i^{\max})$, останню формулу можна записати у вигляді:

$$[W_i^{\max}]_{\min} = (W_i^{\max} \cdot (T_{\max}/T_{\min}) / (T_{\max}/T_{\min} - 1) - q) \cdot (T_{\max}/T_{\min} - 1) \cdot T_{\min}/T_{\max}. \quad (6)$$

В якості прикладу застосування розробленого підходу до прогнозування характеристик індивідуального перебігу процесів деградації внутрішньої будови та властивостей ТС у нерівноважних умовах під впливом передбачуваних та випадкових факторів, розглянемо особливості процесу експлуатації сталі ASTM A316 промислового виробництва. Ця сталь є аустенітною, високоміцною, корозійностійкою, дисперсно-зміцненою сталлю, яка призначена для виготовлення деталей ядерних реакторів на швидких нейтронах [2], що експлуатуються за температур до ~ 873 К ($\sim 600^\circ\text{C}$). Згідно результатів [2], механізмом пластичної деформації такої сталі в інтервалі температур $573 \dots 873$ К є дислокаційна повзучість, яка полягає у почерговому розвитку процесів ковзання та переповзання дислокацій. Процес ковзання, як відомо, відбувається шляхом огинання мобільними дислокаціями частинок зміцнюючих фаз з подоланням енергетичного бар'єру $2Gb^3$ за температури 0 К. Враховуючи високу ймовірність утворення структурних неоднорідностей у високолегованих промислових сталях (зон вільних від частинок зміцнюючих фаз тощо) та тривале збереження сформованих неоднорідностей у відповідній промисловій продукції (внаслідок уповільненої дифузії хімічних елементів заміщення), природним є існування у структурі вказаної сталі певної частки зерен, в інтер'єрі яких відсутні частинки зміцнюючих фаз внаслідок їхньої локалізації вздовж меж зерен. За таких умов, згідно [2], процес переміщення мобільних дислокацій в інтер'єрі зерен контролює їхній перетин з дислокаціями «лісу», що потребує подолання енергетичного бар'єру заввишки $0.5Gb^3$ за температури 0 К. Звідси можна визначити середній спротив ковзанню дислокацій крізь вкрай велику кількість зерен двох вказаних різновидів, як: $(2Gb^3 + 0.5Gb^3)/2 = 1.25Gb^3$. Окрім того, в умовах підвищених температур, які забезпечують послідовний розвиток процесів ковзання та переповзання дислокацій, етапом, який контролює процес переміщення дислокації в цілому (домінуючим етапом), буде той, який матиме найвищий енергетичний бар'єр, подолання якого є необхідним задля переміщення окремої дислокації на велику відстань у кристалі. Таким процесом серед двох вище згаданих є процес ковзання дислокацій, який може бути розглянуто як діючий окремо. Цей висновок узгоджується з експериментальними даними [2] щодо повзучості високоміцних сталей та сплавів, які відповідають процесу термічно-активованого ковзання дислокацій, на відміну від повзучості, що контролюється переповзанням.

Виходячи з викладеного та формули (1) будемо мати:

$$T_i^{\max}(q) \approx 873 \cdot 1.25Gb^3/2 \cdot Gb^3 \approx 550 \text{ K } (\sim 280^\circ\text{C}),$$

що відповідає відомій [2] мінімальній температурі ($\sim 300^\circ\text{C}$) початку розвитку повзучості в сталях, яка являє собою пластичну деформацію твердого матеріалу за низьких експлуатаційних навантажень, обумовлену підвищеною температурою матеріалу. Внаслідок вказаних незворотних змін форми та розмірів частинок зміцнюючих фаз, за постійних зовнішніх навантажень, матеріал поступово втрачає свою здатність здійснювати певні заплановані функції під час своєї експлуатації, що можна визначити як деградацію його експлуатаційних властивостей.

Таким чином, виконаний аналіз засвідчує, що запропонований теоретичний підхід дозволяє, зокрема, стосовно металевих сплавів прогнозувати діапазон температур їхньої можливої експлуатації в умовах деградаційних впливів передбачуваного та випадкового характеру, відповідно, температури та структурних неоднорідностей. Отримані результати та фундаментальне теоретичне підґрунтя дають підстави задля широкого використання розробленого теоретичного підходу у різних сферах застосування: наука, техніка, економіка, медицина та ін.

Висновки

1. Виходячи з фундаментальних фізичних законів (закону збереження енергії, другого закону термодинаміки) розроблено теоретичний підхід задля індивідуального прогнозування характеристик енергетичного стану ТС у нерівноважних умовах експлуатації, що супроводжуються передбачуваною та випадковою деградацією їх внутрішньої будови та функціональних властивостей.

2. Отримано аналітичні співвідношення, що дозволяють розраховувати значення базових параметрів: інтервалу температур, ступенів випадкової деградації внутрішньої будови та властивостей, запасу внутрішньої енергії та ін., що забезпечують ефективне функціонування ТС з урахуванням індивідуальних особливостей їхньої внутрішньої будови та умов функціонування.
3. Розроблений підхід застосовано задля прогнозування інтервалу температур розвитку процесу дислокаційної повзучості аустенітної, корозійностійкої, дисперсно-зміцненої сталі ASTM A316 промислового виробництва для виготовлення деталей ядерних реакторів на швидких нейтронах.
4. Показано високу точність прогнозування припустимих значень характеристик металевих матеріалів, що експлуатуються в умовах деградаційних впливів передбачуваного та випадкового характеру, відповідно, температури та структурних неоднорідностей.
5. Отримані результати та фундаментальне теоретичне підґрунтя засвідчують можливість використання розробленого теоретичного підходу у різних сферах застосування: наука, техніка, економіка, медицина та ін.

Перелік використаних джерел:

1. Reed R.C. The Superalloys: Fundamentals and Applications / R.C. Reed. – Cambridge University Press, 2006. – 372 p.
2. Frost H. Deformation mechanism maps for pure iron and alloy steels, in «Fundamental Aspects of Structural Alloy Design» / H. Frost, M. Ashby; Ed.: R. Jaffee and B. Wilcox. – NY: Plenum Press, 1977. – 459 p.
3. Martin J. Stability of microstructure in metallic systems / J. Martin, R. Doherty – Cambridge University Press, Cambridge, 1997. – 426 p.
4. Energy Efficient Design of Auxiliary Systems in Fossil-Fuel Power Plants. ABB Energy Efficiency Handbook. – 2009. – 362 p. – Mode of access: https://web.archive.org/web/20140805131600/http://www.seeei.org.il/prdFiles/2702_desc3.pdf.
5. Adams W.M. Transition to Sustainability: Towards a Humane and Diverse World / W.M. Adams, S.J. Jeanrenaud. – Gland, Switzerland: IUCN, 2008. – 111 p. – Mode of access: [https://www.iucn.org/sites/dev/files/import/downloads/transition to sustainability sep 08 en 2.pdf](https://www.iucn.org/sites/dev/files/import/downloads/transition%20to%20sustainability%20sep%2008%20en%202.pdf).
6. Collins J.M. Climatology / J.M. Collins // Oxford Bibliographies in Geography. – 2018. – Mode of access: <https://doi.org/10.1093/obo/9780199874002-0096>.
7. The value of vital sign trends in predicting and monitoring clinical deterioration: A systematic review / I.J. Brekke, L.H. Puntervoll, P.B. Pedersen, J. Kellett, M. Brabrand // PloS one. – 2019. – Vol. 14 (1). – Pp. 1-13. – Mode of access: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0210875>.

References:

1. Reed R.C. The Superalloys: Fundamentals and Applications. Cambridge University Press Publ., 2006. 372 p.
2. Frost H., Ashby M. Deformation mechanism maps for pure iron and alloy steels, in «Fundamental Aspects of Structural Alloy Design». New York, Plenum Press Publ., 1977. 459 p.
3. Martin J., Doherty R. Stability of microstructure in metallic systems. Cambridge, Cambridge University Press Publ., 1997. 426 p.
4. Energy Efficient Design of Auxiliary Systems in Fossil-Fuel Power Plants. ABB Energy Efficiency Handbook. 362 p. Available at: https://web.archive.org/web/20140805131600/http://www.seeei.org.il/prdFiles/2702_desc3.pdf. (accessed 13 February 2021).
5. Adams W.M., Jeanrenaud S.J. Transition to Sustainability: Towards a Humane and Diverse World. Gland, Switzerland, IUCN Publ., 2008. 111 p. Available at: [https://www.iucn.org/sites/dev/files/import/downloads/transition to sustainability sep 08 en 2.pdf](https://www.iucn.org/sites/dev/files/import/downloads/transition%20to%20sustainability%20sep%2008%20en%202.pdf). (accessed 20 February 2021).
6. Collins J.M. Climatology. *Oxford Bibliographies in Geography*, 2018. doi: 10.1093/obo/9780199874002-0096. Available at: <https://www.oxfordbibliographies.com/view/document/obo-9780199874002/obo-9780199874002-0096.xml>. (accessed 01 February 2021).

7. Brekke I.J., Puntervoll L.H., Pedersen P.B., Kellett J., Brabrand M. The value of vital sign trends in predicting and monitoring clinical deterioration: A systematic review. *PloS one*, 2019, vol. 14 (1), pp. 1-13. doi: 10.1371/journal.pone.0210875. Available at: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6333367/>. (accessed 01 March 2021).

Рецензент: В.О. Маслов
д-р техн. наук, професор, ДВНЗ «ПДТУ»

Стаття надійшла 23.03.2021

УДК 66.046:532.137

doi: 10.31498/2225-6733.42.2021.240586

© Макуров С.Л.¹, Погібасєв О.Є.²

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОПРОВІДНОСТІ ШЛАКІВ, ЩО ЗАСТОСОВУЮТЬСЯ У ПРОЦЕСАХ СПЕЦІАЛЬНОЇ ЕЛЕКТРОМЕТАЛУРГІЇ (СЕМ)

Розвиток металургійної промисловості України в значній мірі залежить від експорту спеціальних сталей високої якості, які одержують способами спеціальної електрометалургії. Якість металу, що одержують такими способами (в першу чергу способом ЕШП), визначається властивостями флюсу на основі CaF_2 , з якого протягом плавки утворюється рідкий шлак. Шлак служить джерелом теплоти, а також середовищем, в якому включення, що містяться в металі, та шкідливі домішки видаляються в результаті хімічної реакції або розчинення. Впливаючи на шлак, можна здійснювати вплив не лише на хімічний склад, а також на структуру злитка. В цілому вказані шлаки повинні мати не лише високу рафінуючу здатність, а й відповідати ряду інших вимог, які на практиці частенько вступають у протиріччя. У кожному конкретному випадку треба підібрати такий шлак, який відповідатиме найбільш важливим вимогам, у першу чергу має оптимальну електропровідність. З метою застосування шлаків раціонального хімічного складу виконали експериментальні дослідження електропровідності деяких шлаків, що застосовують у процесах спеціальної електрометалургії. У роботі використовували експериментальну установку із застосуванням датчика оригінальної конструкції. Вимірювальна гарунка, що занурюється у тигель з рідким шлаком, зроблена з нітрідборового циліндра, у який вставлена терморпара та вольфрамові електроди для вимірювання електропровідності. Вимірювання проводили з використанням змінного струму із частотою 400 Гц. Одержані експериментальні результати добре відповідають літературним даним щодо флюсів із хімічним складом близьким к дослідженню і даним розрахунків за рекомендованою в літературі емпіричною формулою. Результати виконаних досліджень дозволяють рекомендувати для промислового використання флюси АН-14 та АН-15, які, крім усього, вміщують невелику кількість шкідливого для здоров'я плавикового шпату.

Ключові слова: флюс, шлак, плавлення, температура, хімічний склад, електропровідність, тигель, вимірювання.

S.L. Makurov, O.E. Pogibayev. Experimental study of electrical conductivity of slags used in special electrometallurgy (SEM). The development of the metallurgical industry

¹ д-р техн. наук, професор, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, makurov@ukr.net

² студент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, legdars.official@gmail.com

of Ukraine largely depends on the export of special high-quality steels, which are obtained by special electrometallurgy. The quality of the metal obtained by such methods (primarily by the ESR method) is determined by the properties of the flux based on CaF_2 , from which liquid slag is formed during melting. Slag serves as a source of heat, as well as an environment in which the inclusions contained in the metal and harmful impurities are removed by chemical reaction or dissolution. Affecting the slag can affect not only the chemical composition but also the structure of the ingot. In general, these slags must not only have a high refining capacity, but also meet a number of other requirements, which in practice often come into conflict. In each case it is necessary to choose such slag which will meet the most important requirements, first of all has optimum electric conductivity. In order to use slags of rational chemical composition, experimental studies of the electrical conductivity of some slags used in SEM processes were performed. The work used an experimental setting, using a sensor of the original design. The measuring ring, which is immersed in a crucible with liquid slag, is made of a nitridescent cylinder, into which a thermocouple and tungsten electrodes are inserted to measure electrical conductivity. The measurements were performed using alternating current with a frequency of 400 Hz. The obtained experimental results correspond well to the literature data on fluxes with a chemical composition close to the studied ones and to the calculation data according to the empirical formula recommended in the literature. The results of the performed researches allow to recommend for industrial use fluxes AN-14 and AN-15, which, in addition, contain a small amount of fusible harmful feldspar.

Keywords: flux, slag, melting, temperature, chemical composition, electrical conductance, crucible, measurement.

Постановка проблеми. Розвиток металургійної промисловості України в значній мірі залежить від експорту спеціальних сталей високої якості, які одержують способами спеціальної електрометалургії. Якість металу, що одержують такими способами, в першу чергу способом електро-шлакового переплаву (ЕШП), визначається властивостями флюсу на основі CaF_2 , з якого в ході плавки утворюється рідкий шлак. Шлак служить джерелом теплоти, а також середовищем, в якому включення, що містяться в металі, видаляються в результаті хімічної реакції або розчинення і в якій здійснюється необхідне регулювання вмісту кисню, сірки та інших елементів. Шлак захищає розплавлений метал від безпосереднього атмосферного окислення, створює резервуар тепла вище розплавленого металу, який запобігає утворенню усадкової раковини і внутрішньої усадки. Впливаючи на шлак, можна впливати не лише на хімічний склад, але також і на структуру злитка. В цілому ж шлаки для спеціальної електрометалургії (СЕМ) повинні мати не лише високу рафінуючу здатність, але і відповідати ряду інших вимог. Слід додати, що шлаки для СЕМ по можливості не повинні містити дорогих і дефіцитних компонентів.

Всі ці вимоги на практиці часто вступають в протиріччя і створити шлаки, що повністю відповідають ним, практично неможливо. Проте у кожному конкретному випадку треба підібрати такий шлак, який відповідатиме найбільш важливим вимогам, у першу чергу має оптимальну електропровідність. Електропровідність являється важливою характеристикою шлаків, що використовуються в електрошлакових процесах. Вказаний параметр характеризує в'язкість шлаків (має місце зворотно пропорційна залежність). Шлакова ванна діє як електричний опір в електричному ланцюзі і є джерелом тепла для переплавки. Електропровідність шлаку грає важливу роль при визначенні глибини шлакової ванни і величини струму. Тому дослідження електропровідності рідких шлаків з метою оптимізації їх хімічного складу є актуальним завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Згідно літературним даним [1-6] відомо, що для легкого наведення шлакової ванни шлак має бути порівняно легкоплавким і володіти високою електропровідністю в розплавленому стані. Для підтримки стабільного електрошлакового процесу також необхідно, аби в розплавленому шлаку були присутні катіони, що перешкоджають виникненню дугового розряду, крім того, температура кипіння шлаку або окремих його компонентів має бути досить високою. Цим умовам значною мірою задовольняє фторид кальцію та його сполуки.

Розплави на основі CaF_2 характеризуються іонною провідністю, яка є функцією рухливо-

сті іонів і їх концентрації [3]. Рухливість катіонів залежить від відносної міри зв'язку між відповідними аніонами і катіонами, присутніми в розчині, і визначається розмірами іонів і в'язкістю розплаву. Електричні заряди переносяться через розплав CaF_2 іонами Ca^{2+} і F^- . Домішка оксидів до розплаву знижує провідність, оскільки, хоча іони F^- і O^{2-} мають близькі значення іонних радіусів, подвійний заряд аніона кисню посилює його зв'язок з катіонами і останні стають менш рухливими.

Оксиди з частковим полярним зв'язком (Al_2O_3 , TiO_2) надають більш значний вплив на зниження електропровідності в порівнянні з іонними зв'язками (CaO , MgO), оскільки вони мають тенденцію до утворення агрегатів і комплексних іонів (таких, як $\text{Al}_3\text{O}_7^{5-}$, AlO_3^{3-} , $\text{AlO}_2\text{F}_2^{3-}$, AlOF_2^-). Ці агрегати і комплекси мають меншу рухливість завдяки їх великим розмірам.

У літературі [1-3, 7-11] є обмежене число даних щодо електропровідності багатокомпонентних флюсів, близьких по складу до флюсів, що застосовуються в електрошлакових процесах. До того ж ці дані обмежені температурою 1400°C .

В роботі [9] досліджені фізико-хімічні властивості ряду флюсів системи $\text{CaF}_2\text{-CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$, що застосовуються при електрошлаковому обігріві і електрошлаковому розливанні. Експериментальні флюси №4 і №5 [5] близькі за складом до флюсу АН-14, АН-15 і АН-22.

Тому дані по електропровідності з роботи [9] можуть бути використані для оцінки електропровідності цих флюсів. Для порівняння можуть бути взяті також дані з роботи [11] по електропровідності флюсу АНФ-8. Цей флюс відноситься до системи $\text{CaF}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO}$ і має в своєму складі 50-60% CaF_2 . Тому його електропровідність повинна бути вище, ніж електропровідність розглянутих багатокомпонентних флюсів, в яких вміст CaF_2 знаходиться в межах 20-24%. Для визначення електропровідності багатокомпонентних шлаків на основі CaF_2 авторами [10] запропонована емпірична формула, отримана на основі експериментального вимірювання електропровідності 40 різних шлакових систем, що застосовуються в промисловості:

$$\kappa = 100 \exp(1,911 - 1,38N_x - 5,69N_x^2) + 0,39(t - 1973), \quad (1)$$

де κ – питома електропровідність, $\text{Om}^{-1}\text{m}^{-1}$; N_x – молярна частка відповідних оксидів в шлаку; t – температура, $^\circ\text{C}$;

$$N_x = N_{\text{Al}_2\text{O}_3} + 0,2N_{\text{CaO}} + 0,75N_{\text{SiO}_2} + 0,5(N_{\text{TiO}_2} + N_{\text{ZrO}_2}).$$

Метою роботи є експериментальне дослідження електропровідності рідких шлаків для процесів СЕМ, необхідне для вибору флюсів оптимального складу.

Виклад основного матеріалу. В літературі [7-11] наведено доволі численні результати досліджень електропровідності багатокомпонентних шлаків на спеціально сконструйованих експериментальних установках. У даній роботі використовували експериментальну установку, відмінність якої від відомих полягає в конструкції датчика.

Рівняння (1) можна застосувати для температур розплавленого шлаку від 1823 до 2053 K . Застосування цього рівняння дозволяє за даними авторів роботи [10] визначити електропровідність багатокомпонентних шлаків з точністю до 10%. Більш точні дані можуть бути отримані тільки експериментальними методами.

Схема вимірювального пристрою представлена на рисунку 1. Пристрій складається з двох вольфрамових електродів (1) діаметром 1 мм, щільно вставлених в блок (2), виготовлений з нітриду бору. Виступаючі кінці електродів разом з блоком утворюють вимірювальну комірку, яка занурюється в шлак. Блок кріпиться до алундової трубки за допомогою вогнетривкої замазки. У трубку вставлена термопара 4 (ВР 5/20), робочий спай якої занурений в блок 2. На холодний кінець алундової трубки надіта розпірна трубка 5 з асбоцементу. Така конструкція осередку має достатню твердість, а робочий блок з нітриду бору, який не змочується шлаковим розплавом, – високу термостійкість, шлакостійкість і незначний коефіцієнт лінійного розширення.

Досліджуваний шлак розплавляють в тиглі з нітриду бору, встановленому в центральній зоні графітового нагрівача високотемпературної печі опору. Температуру печі контролювали вольфрам-ренієвою термопарою ВР 5/20, підключеною до потенціометра.

Після досягнення температури 1400°C в шлак занурювали робочу частину вимірювального пристрою (приблизно 2/3 блока 2, см. рис. 1) і після розплавлення шлакового гарнісажу на електродах і робочому блоці приступали до вимірювання електроопору осередки, зануреної в шлак. Опір осередки вимірювали за допомогою реохордного моста, що живиться змінним

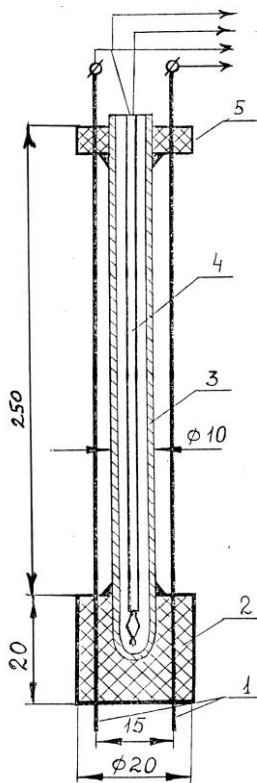


Рис. 1 – Схема приладу для вимірювання електропровідності шлаку: 1 – вольфрамові електроди; 2 – робочий блок з нітриду бора; 3 – алундова трубка; 4 – термопара; 5 – втулка з азбоцементу

ності логарифма електропровідності від зворотної температури.

Електропровідність розплавлених шлаків пов'язана з температурою відомою залежністю:

$$\kappa = A \cdot e^{-\frac{E_x}{RT}}, \quad (2)$$

де E_x – енергія активації провідності.

У логарифмічному вигляді ця залежність має вигляд:

$$\lg \kappa = -\frac{E_x}{2,3RT} + B, \quad (3)$$

де A і B – постійні величини. При постійній величині E_x , що справедливо для невеликого температурного інтервалу, залежність $\lg \kappa - 1/T$ повинна бути лінійною.

Таблиця

Хімічний склад досліджених флюсів*

Марка флюсу	Зміст компонентів, %					
	CaF ₂	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	MnO
АН-14	23,3	10,1	17,8	20,6	18,0	6,1
АН-15	22,9	14,3	25,9	22,3	11,5	2,7
АН-22	54,0	6,7	5,7	19,4	14,6	-
АНФ-6	62,0	-	2,3	35,1	-	-

*флюси містять також, %: Fe₂O₃(0,4-0,6); C(0,03-0,04); P(0,02-0,04); S(0,02-0,04).

На рис. 2 крім отриманих експериментальних даних нанесені також дані з робіт різних дослідників і результати розрахунку за формулою (1).

струмом підвищеної частоти (400 Гц) від звукового генератора.

Вимірювання електроопору осередку проводили при нагріванні шлаку до температури порядку 1600-1700°C, а потім при повільному охолодженні (0,17-0,33°C/c) до температури солідусу шлаку. Температуру вимірювальної осередки контролювали ручним переносним потенціометром з автономним живленням, який менш чутливий до зовнішніх електромагнітних полів.

Оскільки неможливо дотримати ідентичність геометричних параметрів датчиків (кожен датчик використовується для вимірювання електропровідності тільки в одному експерименті), в кожному випадку проводили індивідуальне градування вимірювальної комірки. Для цього використовували водні розчини солей, питома електропровідність яких при кімнатній температурі відома з достатньою надійністю.

Відомо, що при високих температурах багато неелектропровідних вогнетривких матеріалів стають провідниками [12]. Для оцінки можливої похибки справили «холості» виміри опору нагрітої осередки без шлаку. Величини електроопору в останньому випадку виявилися порядку декількох тисяч Ом, тобто на 3-4 порядки вище вимірюваного опору шлаку. Тому зміну опору блоку пристрою, що занурюється в шлак, до уваги не брали. Похибка вимірювань не перевищує 5%.

За розробленою методикою провели вимірювання електропровідності флюсів, хімічний склад яких наведено в таблиці.

Результати визначення електропровідності досліджених флюсів представлені на рис. 2 в вигляді залежності логарифма електропровідності від зворотної температури.

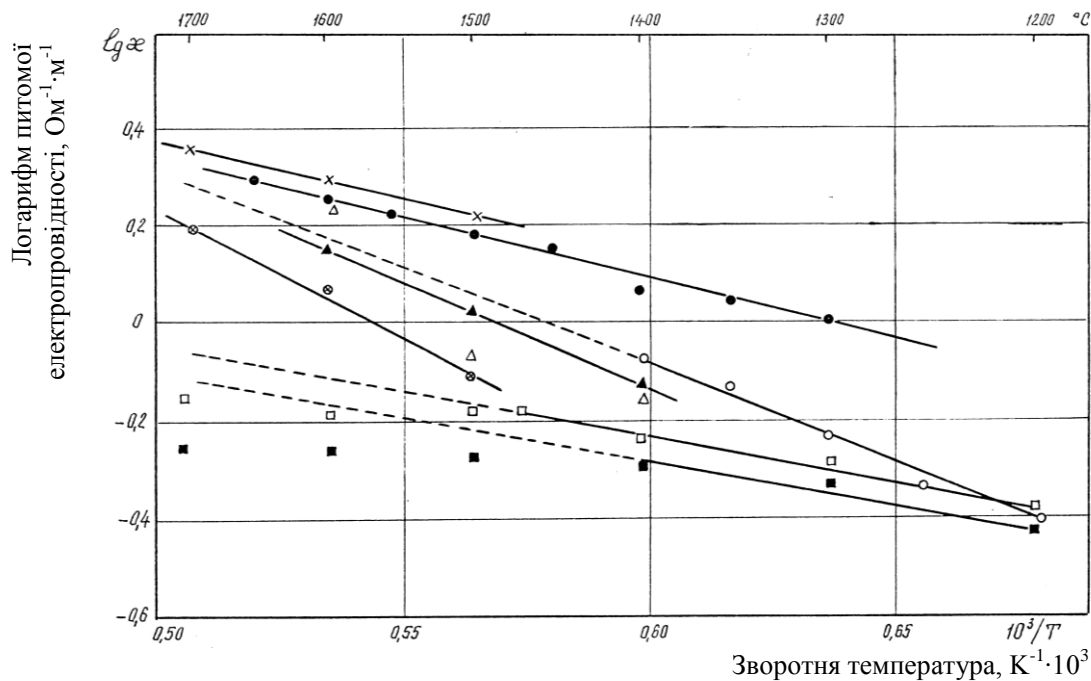


Рис. 2 – Залежність електропровідності шлаків від температури за даними експериментів і розрахунків: □ – АН-14; ■ – АН-15 (експеримент); x – АН-14; ⊗ – АН-15 (розрахунок по ф. 1); ▲ – шлак №4; Δ – шлак №5 (за даними роботи [9]); ○ – АН-22 [7]; ● – АНФ-6 [11]

В області температур до 1500°C результати експериментального визначення електропровідності флюсів АН-14 і АН-15 добре вкладаються на лінійну залежність і близькі до значень за результатами інших досліджень. Однак при температурах вище 1500°C експериментальні дані дещо відхиляються від лінійної залежності, що може бути пов'язано з особливостями використовуваної методики. Тому електропровідність при високих температурах оцінювали шляхом лінійної екстраполяції результатів, отриманих при температурах нижче 1500°C. Абсолютні значення σ в області температур нижче 1500°C для багатокомпонентних флюсів АН-14, АН-15 і АН-22 знаходяться в межах $(0,5-1,0) \cdot 10^2 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$.

Значення енергії активації електропровідності за результатами експериментів становить для флюсів АН-14 і АН-15 $E_x = 36453 \text{ Дж/моль}$, тобто такого ж порядку, як для флюсу АНФ-8 ($E_x = 49861 \text{ Дж/моль}$). У зв'язку з низьким значенням енергії активації провідності з ростом температури відзначається порівняно слабке зростання величини електропровідності. Для флюсу АН-22 в області помірних температур значення такого ж порядку, як для флюсів АН-14 і АН-15. Однак значення енергії активації провідності для флюсу АН-22 становить $E_x = 76677 \text{ Дж/моль}$, і з ростом температури відзначається більш помітне збільшення електропровідності. Проте навіть при температурах, близьких безпосередньо до 1700°C, електропровідність розглянутих флюсів порівняно невелика, що відповідає вимогам до флюсу для електрошлакових процесів.

Отримані дані, а також результати раніше виконаних досліджень [4], дозволяють вважати, що найбільш сприятливими з точки зору електропровідності, хімічного складу і температурного інтервалу плавлення є флюси АН-14 і АН-15, розроблені в ІЕС ім. Є.О. Патона. Ці флюси є також менш шкідливими для здоров'я, тому що містять CaF_2 в помірній кількості.

Висновки

1. Розроблено вдосконалений метод вимірювання електропровідності рідких шлаків в інтервалі температур 1300-1600°C, який в порівнянні з відомими методами є більш точним і надійним, що дозволяє рекомендувати його до використання в лабораторній практиці.
2. Отримано нові експериментальні дані щодо електропровідності шлаків, що застосовуються в процесах спеціальної електрометалургії, що дозволили з урахуванням встановлених

раніше інтервалів температур кристалізації рекомендувати до використання у виробництві малофторидні флюси АН-14 і АН-15.

Перелік використаних джерел:

1. Латаш Ю.В. Современные способы производства слитков особо высокого качества / Ю.В. Латаш, В.Н. Матях. – К. : Наукова думка, 1987. – 336 с.
2. Шалимов А.Г. Интенсификация процессов специальной электрометаллургии / А.Г. Шалимов, В.Н. Готин, Н.А. Тулин. – М. : Metallurgiya, 1988. – 334 с.
3. Специальные способы литья : Справочник / В.А. Ефимов [и др.]; под общ. ред. В.А. Ефимова. – М. : Машиностроение, 1991. – 436 с.
4. Макуров С.Л. Исследование температуры плавления шлаков применяемых в процессах специальной электрометаллургии / С.Л. Макуров, Л.И. Тарасюк, К.Д. Голуб // Вісник Приазовського державного технічного університету : Зб. наук. пр. / ДВНЗ «ПДТУ». – Маріуполь, 2019. – Вип. 38. – С. 7-13. – (Серія: Технічні науки). – Режим доступу: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.38.2019.181247>.
5. Макуров С.Л. Особенности кристаллизации и качество двухслойного горизонтального слитка для производства биметаллического листа / С.Л. Макуров, Е.А. Казачков, Т.Г. Логутова // Вісник Приазовського державного технічного університету : Зб. наук. пр. / ДВНЗ «ПДТУ». – Маріуполь, 2001. – Вип. 11. – С. 70-74.
6. Чепурной А.Д. Пути совершенствования электрошлаковой технологи в производстве отечественных изделий машиностроения / А.Д. Чепурной // Весник Приазовского государственного технического университета : Сб. науч. тр. – Мариуполь, 1999. – Вып. 7. – С. 32-39.
7. Влияние алюминия и кремния на электропроводность фторидноокисидных шлаков / В.А. Воронов, Н.Ф. Яковлев, А.Н. Прохоров, Е.М. Стригачев // Известия Академии наук СССР. Металлы. – 1979. – № 5. – С. 60-63.
8. Электрошлаковый металл / Под ред. Б.Е. Патона, Б.И. Медовара. – К. : Наукова думка, 1981. – 680 с.
9. Исследование физико-химических свойств флюсов системы $\text{CaF}_2\text{-CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$, применяемых при ЭШО и ЭШР / Ю.В. Латаш [и др.] // Специальная электрометаллургия : Сб. науч. тр. / ИЭС им. Е.О. Патона. – К.-М., 1977. – Вып. 34. – С. 51-55.
10. Электрошлаковая технология за рубежом / Под ред. Б.Е. Патона, Б.И. Медовара. – К. : Наукова думка, 1982. – 320 с.
11. Лопаев Б.Е. Об электропроводности расплавленных флюсов для электрошлакового переплава и подогрева / Б.Е. Лопаев, А. А. Плышевский, В.В. Степанов // Автоматическая сварка. – 1966. – № 1. – С. 31-34.
12. Корсунский М.М. Четырехэлектродный метод измерения электропроводности проводящих жидкостей и газов при высоких давлениях и высоких температурах / М.М. Корсунский // Теплофизика высоких температур. – 1979. – Т. 17, № 2. – С. 386-388.

References:

1. Latash Ju.V., Matjah V.N. *Sovremennye sposoby proizvodstva slitkov osobo vysokogo kachestva* [Modern methods of producing high quality ingots]. Kyiv, Naukova dumka Publ., 1987. 336 p. (Rus.)
2. Shalimov Al.G., Gotin V.N., Tulin N.A. *Intensifikatsiia protsessov spetsial'noi elektrometallurgii* [Intensification of processes of special electrometallurgy]. Moscow, Metallurgija Publ., 1988. 334 p. (Rus.)
3. Efimov V.A., Anisovich G.A., Babich V.N. *Spetsial'nye sposoby lit'ia* [Special Casting Methods]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1991. 436 p. (Rus.)
4. Makurov S.L., Tarasjuk L.I., Golub K.D. *Issledovanie temperatury plavlennia shlakov primeniaemykh v protsessakh spetsial'noi elektrometallurgii* [Investigation of the melting point of slags used in the processes of special electrometallurgy]. *Visnik Priazovs'kogo Derzhavnogo Tekhnichnogo Universitetu. Serii: Tekhnichni nauki – Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical sciences*, 2019, vol. 38, pp. 7-13. (Rus.)
5. Makurov S.L., Kazachkov E.A., Logutova T.G. *Osobennosti kristallizatsii i kachestvo dvou-*

- khsloinogo gorizontal'nogo slitka dlia proizvodstva bimetallicheskogo lista [Features of crystallization and quality of two-layer horizontal ingot for the production of bimetallic sheet]. *Visnik Priazovs'kogo Derzhavnogo Tekhnichnogo Universitetu – Reporter of the Priazovskyi State Technical University*, 2001, vol.11, pp. 70-74. (Rus.)
6. Chepurnoj A.D. Puti sovershenstvovaniia elektroshlakovoi tekhnologi v proizvodstve otechestvennykh izdelii mashinostroeniia [Ways to improve electroslag technology in the production of domestic mechanical engineering products]. *Visnik Priazovs'kogo Derzhavnogo Tekhnichnogo Universitetu – Reporter of the Priazovskyi State Technical University*, 1999, vol. 7, pp. 32-39. (Rus.)
 7. Voronov V.A., Jakovlev N.F., Prohorov A.N., Strigachev E.M. Vliianie aliuminiia i kremniia na elektroprovodnost' ftoridnooskidnykh shlakov [The influence of aluminum and silicon on the electrical conductivity of fluoride oxide slags]. *Izvestiia Akademii nauk SSSR. Metally – Bulletin of the USSR Academy of Sciences. Metals*, 1979, no. 5, pp. 60-63. (Rus.)
 8. Paton B.E., Medovar B.I. *Elektroshlakovyi metall* [Electroslag metal]. Kyiv, Naukova dumka Publ., 1981. 680 p. (Rus.)
 9. Latash Yu.V., Zhdanovskii A.A., Fetisov T.Ya. Issledovanie fiziko-khimicheskikh svoystv flusov sistemy CaF₂-CaO-Al₂O₃-SiO₂, primeniemykh pri EShO i EShR [Investigation of the physico-chemical properties of fluxes of the CaF₂-CaO-Al₂O₃-SiO₂ system used in EShO and EShR]. *Spetsial'naiia elektrometallurgiiia – Special electrometallurgy*, 1977, no. 34, pp. 51-55. (Rus.)
 10. Paton B.E., Medovar B.I. *Elektroshlakovaia tekhnologiia za rubezhom* [Electroslag technology abroad]. Kyiv, Naukova dumka Publ., 1982, 320 p. (Rus.)
 11. Lopaev B.E., Plyshevskij A.A., Stepanov V.V. Ob elektroprovodnosti rasplavlennykh flusov dlia elektroshlakovogo pereplava i podogreva [On the electrical conductivity of molten fluxes for electroslag remelting and heating]. *Avtomaticheskaiia svarka – Automatic Welding*, 1966, no. 1, pp. 31-34. (Rus.)
 12. Korsunskij M.M. Chetyrekhelektroodnyi metod izmereniia elektroprovodnosti provodiashchikh zhidkostei i gazov pri vysokikh davleniiakh i vysokikh temperaturakh [Four-electrode method for measuring the conductivity of conductive liquids and gases at high pressures and high temperatures]. *Teplofizika vysokikh temperature – High Temperature*, 1979, vol.17, no. 2, pp. 386-388. (Rus.)

Рецензент: В.О. Маслов
д-р техн. наук, проф., ДВНЗ «ПДТУ»

Стаття надійшла 16.03.2021

УДК 621.742.4

doi: 10.31498/2225-6733.42.2021.240588

© **Большаков Л.А.**¹, Дан Л.О.², Трофімова Л.О.³

ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ФОРМУВАЛЬНИХ СУМІШЕЙ, ЩО МІСТЯТЬ ЛІГНОСУЛЬФОНАТИ ТА ПОЛІЕТІЛЕНПОЛІАМІН

В роботі розглянуті результати досліджень комплексу властивостей формувальних сумішей, що містять в якості сполучного лігносульфонати технічні в поєднанні з поліетиленполіаміном.

Ключові слова: *формувальна суміш, сполучне, лігносульфонати, поліетиленполіамін, міцність.*

¹ канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь

² канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, trofimova.pstu@gmail.com

³ канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, trofimova.pstu@gmail.com

L.A. Bolshakov, L.O. Dan, L.O. Trofimova. *The study of the properties of moulding sands containing lignosulfonates and polyethylenepolyamine.* The experience of foundry shows that the quality of castings, manufactured in sand moulds, directly depends on the properties of moulding and core sands. These properties depend on the type and characteristics of the binding materials. None of the existing sands compositions provide an ideal combination of properties. Therefore, you have to look for all new alternatives. Technical lignosulfonates have been used for a long time as an inexpensive binder. Based on literary data, the conclusion has been made that lignosulfonates have not found wide use as an independent binder in moulding sands due to low strength of sands in the dried state. As an additional component improving the binding properties of lignosulfonates, the authors have proposed to use polyethylenepolyamine. In the process of research, a high-strength binder based on technical lignosulfonates and high molecular weight polyethylenepolyamine has been developed. A complex of physical, mechanical and technological properties of the binder, as well as the strength properties of moulding sands prepared on its basis, has been investigated. It has been shown that the experimental sands have strength characteristics both in the green and in the dried state of 6-10 times higher as compared to the sands containing lignosulfonates only. In doing so, high dry strength values are achieved at a relatively low drying temperature (180°C), both for sands without clay, and for the ones containing clay. Based on this, it has been concluded that it is possible to reduce the amount of the binding in the sands to achieve the optimal level of their strength properties. The achieved results, if introduced into production, will make it possible to increase not only the geometric accuracy of castings and the surface quality, but also to reduce the costs of knocking off and cleaning operations as well.

Keywords: molding sand, binder, lignosulfonates, polyethylenepolyamine, strength.

Постановка проблеми. Якість виливків в рівній мірі залежить як від якості ливарної форми, так і від якості рідкого металу, що заливають в цю форму.

Тому зазвичай вважають, що суттєвим резервом підвищення якості виливків, отриманих в піщано-глинисті форми, є поліпшення властивостей формувальних матеріалів, які використовуються для їх виготовлення. Серед властивостей, що визначають якість сирих ливарних форм, найбільш значима міцність на стиск, а для сухих – міцність при розтягуванні. Ливарні форми і стрижні повинні мати певну міцність і не руйнуватися під впливом власної ваги і різних навантажень під час збірки і транспортування. Під час заливки форма повинна витримувати статичний і динамічний тиск струменя металу.

Жодна з існуючих систем сполучних такі характеристики не забезпечує в повній мірі. Недосконалість відомих рішень змушує шукати все нові і нові варіанти.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В якості самостійного сполучного теплового твердіння лігносульфонати (ЛСТ) не знайшли широкого застосування тому що не забезпечують високу міцність форм і стержнів у твердому стані. Сполучні властивості ЛСТ можна поліпшити, якщо поєднати їх з іншими сполучними [1].

Високомолекулярний поліетиленполіамін з молекулярною масою 10000-20000 (див. рис. 1) володіє гарною сполучною здатністю, тому може бути використаний для протипригарних покриттів, стрижневих і формувальних сумішей. Він вступає з лужними лігновмісткими речовинами в хімічну взаємодію і утворює після видалення вологи в процесі сушіння міцну плівку комплексного сполучного [1-5].

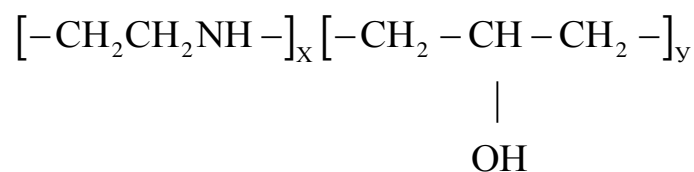


Рис. 1 – Структурна формула поліетиленполіаміну; співвідношення x:y = від 5:1 до 2:1

Мета статті. Метою цієї роботи було дослідження властивостей сполучних, що містять, окрім лігносульфонатів, високомолекулярні органічні компоненти, і формувальних сумішей на їх основі.

Виклад основного матеріалу. У процесі роботи було розроблено високоміцне сполучне на основі технічних лігносульфонатів і високомолекулярного поліетиленполіаміну. Таке сполучне можна використовувати при виготовленні протипригарних покриттів, стрижневих і формувальних сумішей [6].

Для випробування приготували п'ять варіантів сполучних матеріалів з різними масовими співвідношеннями поліетиленполіаміну і лігносульфонатів технічних, причому полімери відрізнялися молекулярною масою, а лігносульфонати – вмістом їдкого натру.

Вміст лужних лігносульфонатів коливався від 90% мас. в сполучному №1 до 10% мас. в сполучному №5. Самі ж лужні лігносульфонати отримували шляхом змішування лігносульфонатів технічних зі лугом у співвідношенні від 80:20 в сполучному №1 до 90:10 в сполучному №5.

Вміст високомолекулярного поліетиленполіаміну змінювали в межах від 10% мас. в сполучному №1 до 90% мас. в сполучному №5; молекулярну масу поліетиленполіаміну збільшували від 10000 в сполучному №1 до 20000 в сполучному №5.

Вивчено основні показники фізичних властивостей отриманих сполучних.

1. Зовнішній вигляд. Сполучні всіх складів представляли собою однорідну рідину кольором від темно-коричневого (склад №1) до світло-коричневого (склад №5).

2. Вміст сухих речовин зменшувалася від сполучного №1 до сполучного №5 в інтервалі 48,0-32,0%.

3. Вміст золи і вміст нерозчинних у воді речовин до маси сухих речовин відповідно зменшувався від 35,4% до 5,9% і від 0,5% до 0,1%.

4. Умовна в'язкість по віскозиметру ВЗ-4 зменшувалася від 650 секунд у сполучного №1 до 150 секунд у сполучного №5.

5. Зі зменшенням вмісту їдкого натру в сполучному зменшувалася його рН від 10,5 до 9,5 од.

6. Щільність сполучних від №1 до №5 при 20°C знижувалася від 1250 до 1150 кг/м³.

Підготовлені дослідні сполучні матеріали були використані при приготуванні стрижневих сумішей наступного складу (мас.%): 100,0 – кварцовий пісок; 5,0 – дослідне сполучне (понад 100). Для порівняння приготували суміш, що містить (мас.%): 97,0 – кварцовий пісок; 3,0 – глина формувальна; 5,0 – дослідне сполучне (понад 100); 1,0 – вода (понад 100).

Випробування механічних властивостей сумішей проводили на стандартних зразках в сиromу і сухому стані (сушка при 180°C протягом 1 години).

Основні показники міцності властивостей отриманих сумішей (див. рис. 2 і рис. 3).

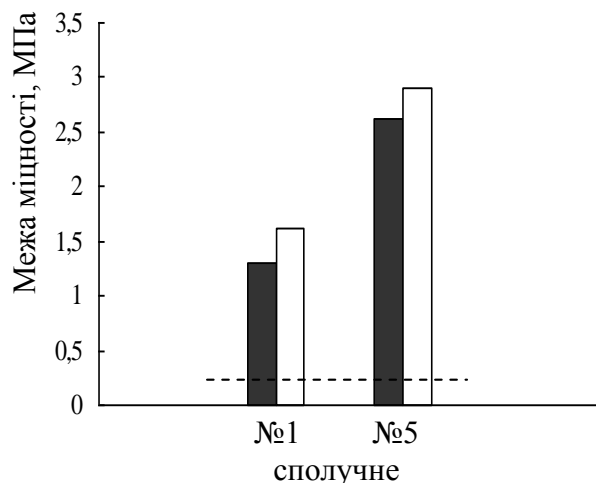


Рис. 2 – Міцність при розтягуванні зразків дослідних сумішей в сухому стані: ■ – з глиною; □ – без глини; - - - - - рівень міцності сумішей з лігносульфонатами

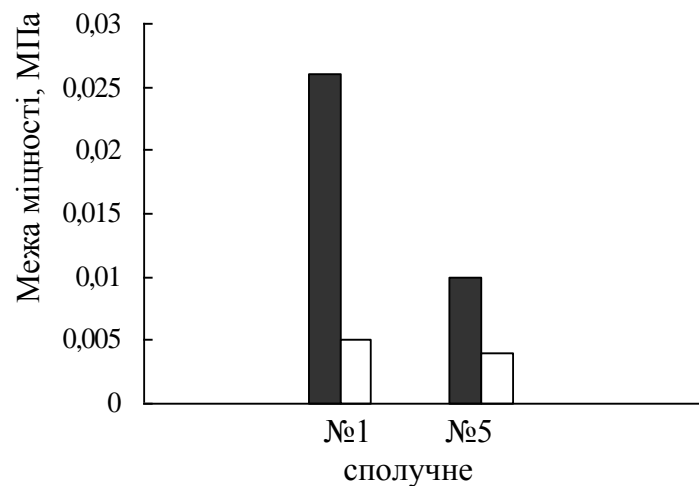


Рис. 3 – Міцність при розтягуванні зразків дослідних сумішей в сирому стані: ■ – з глиною; □ – без глини

Міцність сумішей на розтягнення в сухому стані з глиною і без глини при введенні сполучного №1 відповідно становила 1,31 і 1,62 МПа, а сполучного №5 – 2,61 і 2,90 МПа. Міцність суміші на стиск в сирому стані з глиною і без глини відповідно склала 0,026 і 0,005 МПа для сполучного №1 і 0,010 і 0,004 МПа для сполучного №5.

Висновки

Дослідження, що були проведені, показали, що міцність зразків в сухому стані при використанні дослідного сполучного на порядок вище, ніж при використанні тільки лігносульфонатів [7]. Високі показники міцності в сухому стані досягаються при порівняно низькій температурі сушки (180°C), причому як для сумішей без глини, так і для сумішей з глиною. Міцність на розрив сумішей з добавкою глини в 3-6 разів вище, а сумішей без глини – в 6-10 разів вище, ніж в сумішах з лігносульфонатами [7]. Більш висока міцність сумішей в сухому стані дозволяє знизити розхід сполучних матеріалів, одержувати виливки підвищеної геометричної точності, знизити кількість браку через засмічення, обвали форм і тріщини, підвищити продуктивність праці на фінішних операціях очищення виливків.

Перелік використаних джерел:

1. Белый Г.В. Стержневые смеси на основе связующих лигносульфонатов / В.Г. Белый, В.М. Момот, Е.А. Белобров // Литейное производство. – 1983. – № 11. – С. 14-15.
2. Евстифеев Е.Н. Полимерные связующие материалы на базе технических лигносульфонатов / Е.Н. Евстифеев, Г.И. Рассохин // Прогрессивные полимерные материалы, технология их переработки и применение: тезисы докл. Всерос. науч.-техн. конф. – Ростов-на-Дону, 1995. – С. 52-53.
3. Влияние режимов тепловой обработки на связующие свойства лигносульфонатов с различными основаниями / А.Е. Спасский, Ю.П. Васин, Л.А. Сидоренкова, Я.И. Гельбштейн // Литейное производство. – 1980. – № 8. – С. 11-14.
4. Свинороев Ю. А. Методология разработки новых связующих материалов на основе технических лигносульфонатов / Ю.А. Свинороев // Вісник східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – Луганськ : вид-во СНУ ім. В. Даля, 2007. – № 1 (107). – С. 404-410.
5. Вспомним забытые технологии: стержневые смеси на основе модифицированных лигносульфонатов технических и гидрофобных связующих / Е.А. Белобров, О.Л. Карпенкова, Л.Е. Белобров, Е.Л. Белобров // Литье Украины. – 2017. – № 1 (197). – С. 14-18.
6. Большаков Л.А. Высокомолекулярные органические полимеры и лигносульфонаты в связующих материалах. Сообщение 1. Физические свойства связующих с лигносульфонатами и полиэтиленполиамидами / Л.А. Большаков, Л.А. Трофимова // Университетская

наука – 2012: тез. докл. междунар. науч.-техн. конф. / ПГТУ. – Мариуполь, 2012. – Т. 1. – С. 134-135.

7. Большаков Л.А. Высокомолекулярные органические полимеры и лигносульфонаты в связующих материалах. Сообщение 2. Прочностные свойства формовочных смесей с лигносульфонатами и полиэтиленполиамидами / Л.А. Большаков, Л.А. Трофимова // Университетская наука – 2012 : тез. докл. междунар. науч.-техн. конф. / ПГТУ. – Мариуполь, 2012. – Т. 1. – С. 135-136.

References:

1. Belyiy V.G., Momot V. M., Belobrov E. A. Sterzhnevyye smesi na osnove svyazuyuschih lignosulfonатов [Core sands based on binding lignosulfonates]. *Liteynoe proizvodstvo – Foundry*, 1983, no. 11, pp. 14-15. (Rus.)
2. Evstifeev E.N., Rassohin G.I. Polimernye svyazuiushchie materialy na baze tekhnicheskikh lignosul'fonatov. *Tezisi dokladov Vseros. nauch.-tehn. konf. «Progressivnyie polimernyye materialy, tehnologiya ih pererabotki i primenenie»* [Polymer binders based on technical lignosulfonates. Abstracts reports of All-Russian Scientific and Technical Conference «Progressive Polymer Materials, Processing and Application Technology»]. Rostov-na-Donu, 1995, pp. 52-53. (Rus.)
3. Spasskiy A.E., Vasin Yu.P., Sidorenkova L.A., Gelbshteyn Ya.I. Vliyanie rezhimov teplovoy obrabotki na svyazuyushchie svoystva lignosulfonатов s razlichnyimi osnovaniyami [The effect of thermal processing modes on the binding properties of lignosulfonates with various bases]. *Liteynoe proizvodstvo – Foundry*, 1980, no. 8, pp. 11-14. (Rus.)
4. Svinoroev Yu. A. Metodologiya razrabotki novyih svyazuyuschih materialov na osnove tekhnicheskikh lignosulfonатов [Methodology for the development of new binding materials based on technical lignosulfonates]. *Visnik shidnoukrainskogo natsionalnogo unIversitetu Imeni Volodimira Dalya – Bulletin of the East Ukrainian National University named after Vladimir Dahl*, 2007, no. 1, pp. 404-410. (Rus.)
5. Belobrov E.A., Karpenkova O.L., Belobrov L.E., Belobrov E.L. Vspomnim zabyityie tehnologii: sterzhnevyye smesi na osnove modifitsirovannyih lignosulfonатов tekhnicheskikh i gidrofobnyih svyazuyuschih [Recall the forgotten technologies: rod mixtures based on modified lignosulfonates of technical and hydrophobic binders]. *Lit'e Ukrainy – Foundry of Ukraine*, 2017, no. 1 (197), pp. 14-18. (Rus.)
6. Bolshakov L.A., Trofimova L.A. Vysokomolekuliarnyye organicheskie polimery i lignosul'fonaty v svyazuiushchikh materialakh. Soobshchenie 1. Fizicheskie svoystva svyazuiushchikh s lignosul'fonatami i poli-etilenpoliaminami. *Tezisi dokladov Mezhd. nauk. tehn. konf. «Universitetskaia nauka»* [High molecular weight organic polymers and lignosulfonates in binding materials. Message 1. The physical properties of binders with lignosulfonates and polyethylenepolyamines. Abstracts of Int. Sci.-Pract. Conf. «University science»]. Mariupol, 2012, vol. 1, pp. 134-135. (Rus.)
7. Bolshakov L.A., Trofimova L.A. Vysokomolekuliarnyye organicheskie polimery i lignosul'fonaty v svyazuiushchikh materialakh. Soobshchenie 2. Prochnostnye svoystva formovochnykh smesei s lignosul'fonatami i polietilenpoliaminami. *Tezisi dokladov Mezhd. nauk. tehn. konf. «Universitetskaia nauka»* [High molecular weight organic polymers and lignosulfonates in binding materials. Message 2. The strength properties of molding mixtures with lignosulfonates and polyethylene polyamines. Abstracts of Int. Sci.-Pract. Conf. «University science»]. Mariupol, 2012, vol. 1, pp. 135-136. (Rus.)

Рецензент: Л.І. Тарасюк
канд. техн. наук, доц., ДВНЗ «ПДТУ»

Стаття надійшла 30.04.2021

© Марков О.Є.¹, Панов В.В.², Іванова Ю.О.³,
Хвашинський А.С.⁴, Мусорін А.В.⁵, Косілов М.С.⁶

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ РОЗКОЧУВАННЯ СТУПІНЧАСТИХ КОНУСНИХ КІЛЕЦЬ

У роботі був експериментально досліджений технологічний процес розкочування конусних кілець з буртом. Запропонований спосіб полягає у розкочуванні пустотілої заготовки з буртом бойком зі східчастим профілем. Розроблена методика проведення експериментальних досліджень на свинцевих та сталевих моделях. Розроблена методика дозволила встановити залежності змінення форми ступінчастої пустотілої заготовки при деформуванні її ступінчастим бойком. У дослідженні вивчалися відносна висота виступу ступінчастої вихідної заготовки в інтервалі 2,2...2,5. А також встановлювався вплив ступеня деформації на конусність та зміну діаметрів пустотілої заготовки. Це дослідження було проведено задля отримання інформації стосовно кількісної оцінки формозмінення. Для розробки технологічного процесу кування конусних обичайок з виступом технологу треба мати рекомендації з утворення конусності на поковці залежно від вихідних розмірів ступінчастої пустотілої заготовки, а також ступеня її деформування. На базі експериментального дослідження були встановлені закономірності зміни конусності та діаметрів отворів від ступеня деформації для різних товщин стінок при куванні ступінчастим бойком. Збільшення діаметра виступу заготовок приводить до збільшення ступеня деформації виступу, що викликає збільшення діаметра виступу при розкочуванні. Це дало змогу встановити конусність обичайок, яка з'являється при куванні даним методом. Аналіз макроструктури конусної кільцевої поковки зі східчастим профілем дозволив установити, що при використанні операції розкочування східчастої заготовки східчастим бойком волокна металу повторюють контур деталі. Це виключає їхнє перерізання при механічній обробці. У результаті досліджень було встановлено, що процес розкочування східчастих конусних заготовок можливий та його впровадження у виробництво розширить технологічні можливості процесу кування крупногабаритних поковок.

Ключові слова: конусне кільце, східчасте кільце, розкочування, східчастий бойок, конусність, формозмінення.

O.E. Markov, V.V. Panov, Y.O. Ivanova, A.S. Khvashchynskiy, A.V. Musorin, M.S. Kosilov. Experimental study of rolling processes of stepped conical rings. The work considers the technological process of rolling conical rings with a shoulder. The proposed method consists of rolling a hollow workpiece with a shoulder by a striker with a stepped profile. A methodology for pursuance an experimental research on lead and steel models has been developed. The developed technique made it possible to establish the dependences of the change in the shape of a stepped hollow workpiece under defor-

¹ д-р техн. наук, проф., Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ, ORCID: 0000-0001-9377-9866, oleg.markov.omd@gmail.com

² аспірант, Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ, ORCID: 0000-0002-2373-319X, v.panov@emss.dn.ua

³ аспірант, Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ, ORCID: 0000-0002-4145-9665, yachmen.yuliya@gmail.com

⁴ аспірант, Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ, ORCID: 0000-0002-2690-8354, antonio.hvasherman@ukr.net

⁵ аспірант, Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ

⁶ канд. техн. наук, Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ, ORCID: 0000-0001-6412-3366, kosilovmaksims@gmail.com

mation by a stepped striker. In the study, the relative height of the protrusion of the stepped initial workpiece ranged from 2.2 to 2.5. Influence of the deformation degree on the taper and change in the diameters of the hollow workpiece has been established. This study has been carried out to obtain information on the quantitative assessment of the shape change of the workpiece in the process of its deformation. To develop a technological process for forging conical shells with a protrusion, the technologist must have recommendations on the taper formation on the forged piece, depending on the initial dimensions of the stepped hollow workpiece, as well as the degree of its deformation. On the basis of an experimental study, the regularities of the change in the taper and in the diameters of the holes from the degree of deformation have been established for various wall thicknesses when forging with the stepper striker. An increase of workpieces protrusion height results in an increase of the deformation degree, in an increase in the diameter of the workpiece in this part during rolling. This made it possible to define the magnitude of the shell taper, which is formed at forging by this method. Analysis of the macrostructural structure of a conical annular forging with a stepped profile made it possible to establish that when using the operation of rolling of the stepped workpiece with a stepped striker, the metal fibers replicate the contour of the part. This prevents them from being cut at machining. As a result of the research, it has been found out that the process of stepped conical workpieces rolling is possible and its introduction into production will widen the technological capabilities of the forging process of large-sized forged pieces.

Keywords: conical ring, stepped ring, rolling, stepped striker, taper, deformation.

Постановка проблеми. В останні роки кількість крупних поковок зростає, що пов'язане зі збільшенням потужностей і кількості енергетичних установок і важких машин [1]. Серед виробів заводів важкого й енергетичного машинобудування значну кількість становлять кільця, у тому числі конусної форми. Такі поковки відносяться до відповідальних і до них пред'являються високі вимоги з ізотропності механічних властивостей, внутрішньої структури й ін. Більшість кілець виготовляються з використанням операції розкочування. Однак конусні кільця на сьогоднішній день виготовляються механічною обробкою циліндричних товстостінних кілець, що приводить до підвищених витрат металу через значні напуски, а також зниженню механічних властивостей деталей через перерізання волокнистої будови металу поковки.

Одними з напрямків удосконалення техпроцесу виготовлення крупногабаритних конусних кілець зі східчастим профілем є використання пустотілих східчастих заготовок (злитків) і одержання поковки, яка повторює форму деталі. Пустотілі злитки дозволяють знизити трудомісткість кування крупногабаритних кілець і знизити витрати металу за рахунок відсутності операцій прошивання отвору. Виготовлення східчастих конічних поковок вимагає застосування спеціальних операцій кування пустотілої заготовки (злитка). Актуальним науково-технічним завданням є одержання конусних східчастих поковок, що збігаються з контуром деталі. Це дозволить виключити перерізання волокнистої будови металу й зменшити витрати металу при механічній обробці.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для розробки оптимальних рекомендацій при куванні крупних поковок компанією Creusot-loirc-Industrie був установлений вплив внутрішніх дефектів ковальських заготовок на утворення тріщин [1, 2]. Для кілець ефективним способом є використання пустотілих злитків з контролем розташування зон ліквації. Однак у статті не наведено результати досліджень і не представлені рекомендацій щодо параметрів процесу кування кілець. Особливо корисною була б інформація щодо співвідношень розмірів злитка, яка зменшить неоднорідність хімічного складу й розміри осьової пористості.

Другим етапом удосконалювання процесів виготовлення крупногабаритних конусних східчастих поковок є розробка таких способів кування, які дозволять виготовляти поковки з контуром деталі. Це дозволить виключити перерізання волокнистої будови металу й зменшити витрати металу при механічній обробці. Ці способи полягають у використанні спеціальних ковальських операцій або деформуючого інструмента. У зв'язку із цим необхідно встановити вплив застосовуваних операцій і інструмента на формозміну пустотілих поковок.

Попит на крупногабаритні кільця з діаметром до 10 метрів і висотою до 6 метрів обумов-

лений розвитком атомних електростанцій [3]. Виробництво кілець такої висоти дозволяє спростити конструкцію корпусу реактора. Щоб виготовляти кільця із зазначеними розмірами, необхідно створити спеціальне устаткування для зовнішнього розкочування. Такий розкочувальний пристрій потребує встановлення його під гідравлічним кувальним пресом. Однак подібне оснащення має обмежені технологічні можливості.

Суть способу, описаного в роботі [4], полягає в установці спеціальної поперечини, яка виконує роль бойка. Сила преса передається між рухливою поперечкою й цією поперечиною. Між нижнім інструментом і поперечиною формується кільце із заданою товщиною стінки, яке тримається й повертається за допомогою оправки [5]. Однак у роботі не зазначено, які розміри заготовки були отримані перед розкочуванням і з яким ступенем деформації за прохід по колу воно виконувалося.

Авторами роботи [6] запропонований спосіб кування кілець, який полягає в установці додаткового гідравлічного механізму. У цьому варіанті немає обмежень по максимальних розмірах кілець. Однак у даному способі не зазначено, як одержувати конічні кільця зі східчастою поверхнею.

Аналіз робіт [3-6], у яких основною ідеєю є застосування спеціальних пристосувань і встаткування для розкочування крупногабаритних кілець, дозволив установити, що відсутній ретельний опис конструкції оснащення для розкочування. Також немає рекомендацій щодо параметрів заготовки й параметрів процесу деформування, таких як ступінь деформації й товщина стінки, до якої можливо проводити кування.

Куті кілець можуть бути виготовлені як зі звичайних злитків із застосуванням технологічної операції прошивання, так і з пустотілих [7-9]. Необхідність осадження й прошивання звичайного злитка вимагає крупної кількості матеріальних і енергетичних ресурсів. Для зниження витрат металу й ваги злитків, які йдуть на виготовлення кільцевих поковок, розроблені пустотілі злитки, що значно спрощує послідовність кування й зменшує кількість нагрівань [10].

Аналіз літературних даних [4-11] дозволив установити, що проблема, яка пов'язана зі зниженням витрати металу й підвищенням механічних властивостей при виробництві конусних східчастих кілець, на сьогоднішній день не вирішена. Це викликано тим, що на конусні східчасті деталі призначається крупний припуск на механічну обробку. У результаті виготовляється не конічне кільце, а циліндричне, що й приводить до підвищених витрат металу й перерізанню волокна внаслідок механічної обробки. У зв'язку із цим необхідно розробити й досліджувати новий спосіб одержання поковок крупногабаритних конусних кілець.

Мета статті – зниження витрат металу й розширення технологічних можливостей при куванні конусних пустотілих заготовок на основі розробки нових технологічних процесів розкочування кілець зі східчастою поверхнею. Для досягнення зазначеної мети були поставлені наступні завдання: вибрати методи й розробити методики для досліджень способів розкочування східчастих конусних кілець; провести макроструктурні дослідження поковок, які отримані за новою технологією.

Виклад основного матеріалу. МСЕ має високу точність при визначенні параметрів НДС, у тому числі й для процесів гарячого пластичного деформування, про що свідчить ряд робіт [12-15]. Однак МСЕ є теоретичним методом і вимагає експериментальної верифікації отриманих результатів [16, 17].

Для проведення експериментів виготовлялися свинцеві зразки в масштабі 1:40 до натурної поковки. Зразки виготовлялися литтям свинцю у форму зі стрижнем. Для розкочування був виготовлений східчастий боек. Боек загальною довжиною 130 мм мав сходинку висотою 7 мм і довжину виступу 40 мм. Дорн (оправка для розкочування) мав діаметр 30 мм. З метою одержання точних розмірів і забезпечення необхідного ступеня деформації використовувався набір пластин товщиною по 1 мм. Деформування було проведено на гідравлічному пресі силою 100 кН, швидкість деформування 200 мм/хв.

Для макроструктурних досліджень були проведені експерименти на сталевих зразках. Матеріалом була обрана сталь ХВГ, тому що вона має широке застосування при виробництві крупних поковок. Також був виготовлений інструмент для розкочування: східчастий боек і оправки (рис. 1).

Зразки нагрівалися до температури 1100°C з витримкою 10 хв в електричній печі. Обтис-

нення становило 1 мм за прохід як при протягуванні, так і при розкочуванні. Для розкочування застосовувався дорн Ø25 мм (рис. 1, б) і бойки для з відповідним профілем.

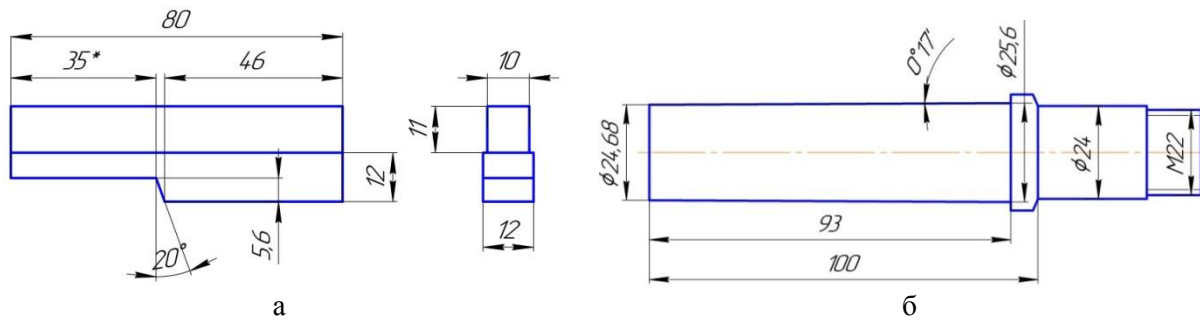


Рис. 1 – Інструмент для експериментальних досліджень: а – східчастий бойок; б – дорн (оправка)

Аналіз експериментальних даних утворення конусності поковки від відносного ступеня деформації уступу дозволив установити (рис. 2), що для відносного діаметра заготовки $D_y/d_{cp} = 2,05$ збільшення відносного ступеня деформації з боку уступу приводить до збільшення конусності. Збільшення конусності пов'язане з інтенсивним збільшенням отвору уступу $d_{п.у}$ під час розкочування. Зниження конусності для заготовки з відносними діаметрами виступів 2,5 при ступені обтиснення $\epsilon < 0,26$ пов'язане з куванням на першому проході в процесі розкочування виступу кільця, у цьому випадку уступ не деформується. Отже, діаметр виступу починає збільшуватися, а діаметр уступу не міняється. Утворюється конічне кільце з діаметром виступу ($D_b/d_{cp} = 2,5, \epsilon = 0,08$). Подальше деформування уступу й виступу знижує конусність до нуля після обтиснення $\epsilon = 0,26$, що вказує на рівність діаметрів уступу й виступу ($d_{п.в} = d_{п.у}$). Зростання конусності для заготовки з відносним діаметром виступу 2,0 пов'язане з інтенсивним збільшенням діаметра отвору уступу, що пояснюється більшим плином металу в тангенціальному напрямку при обтисненні тонкої стінки.

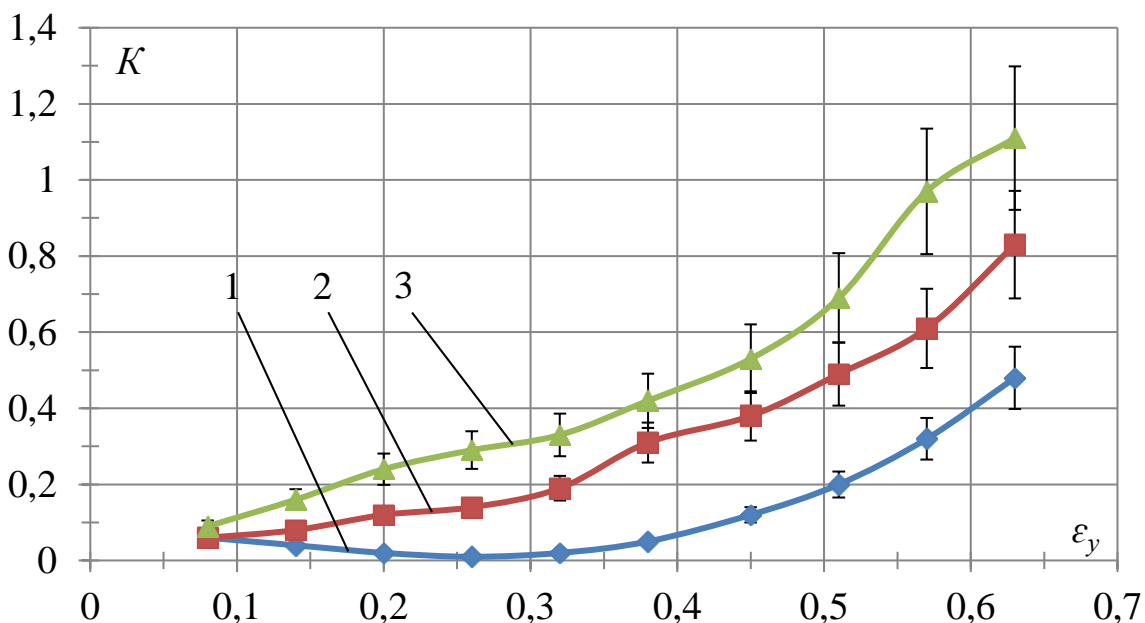


Рис. 2 – Зміна конусності (K) від відносного ступеня деформації уступу (ϵ_y) для заготовок з $D_y/d_{cp} = 2,05$: 1 – $D_b/d_{cp} = 2,50$; 2 – $D_b/d_{cp} = 2,40$; 3 – $D_b/d_{cp} = 2,30$

Важливий результат має зміна співвідношення діаметрів отвору виступу й уступу в процесі розкочування, яке дозволяє встановити якісну та кількісну зміну діаметрів на торцях заготовки при постійній довжині заготовки. Аналізуючи зміну співвідношень діаметрів отвору поковки виступу й уступу $d_{п.в}/d_{п.у}$ від ступеня деформації ϵ_y (рис. 3) для відносного діаметра уступу $D_y/d_{cp} = 2,05$, можна відзначити, що зі збільшенням ступеня деформування ϵ_y співвідношення діаметрів отвору поковки зменшується. Крапка, відзначена окружністю на кривій 1, відповідає відсутності конусності. У відзначеній крапці зазначені діаметри збігаються ($d_{п.в} = d_{п.у}$) і при подальшому деформуванні діаметр отвору уступу збільшується інтенсивніше, чим виступу, і співвідношення торцевих діаметрів отвору поковки $d_{п.в}/d_{п.у}$ стає менше 1,0 ($d_{п.в} < d_{п.у}$).

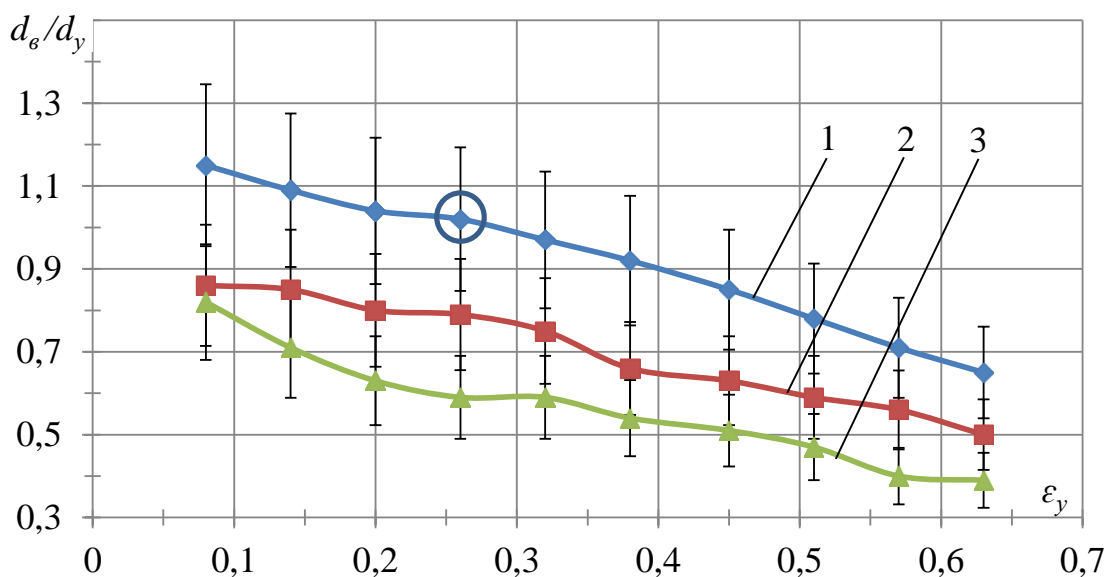


Рис. 3 – Зміна співвідношення діаметрів отвору $d_{п.в}/d_{п.у}$ від відносного ступеня деформації виступу ϵ_B для заготовок з $D_y/d_{cp} = 2,05$: 1 – $D_B/d_{cp} = 2,5$; 2 – $D_B/d_{cp} = 2,4$; 3 – $D_B/d_{cp} = 2,3$

Криві 2 і 3 не проходять вище значення 1,0, що відповідає деформуванню уступу на початку розкочування. Їхнє поступове зниження відбувається через те, що інтенсивніше збільшується діаметр уступу внаслідок більшого накопичення деформацій. Причому отримані закономірності мають практично лінійну залежність.

Нова технологія кування східчастого конусного кільця (рис. 4, а) припускала нагрівання заготовки й протягування її на оправці до поковочних розмірів. Уздовж осі кільцевої поковки були вирізані зразки для металографічних досліджень (рис. 4, б).

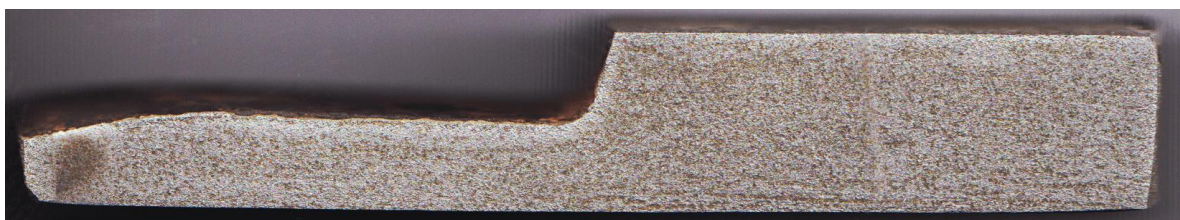
Аналіз отриманих результатів дозволив установити, що нова технологія кування приводить до того, що волокна металу стискаються, в уступі їх щільність більше, чим у виступі (рис. 4, б). Напрямок волокна повторює східчастий профіль поковки, що буде виключати перерізання структури металу, як це відбувається при механічній обробці згідно з базовою технологією.

До обмежень розробленого способу розкочування конусних східчастих заготовок потрібно віднести:

- запропонований спосіб розкочування може застосовуватися для виготовлення конусних кілець тільки зі східчастим профілем;
- при значних величинах конусності кільця ускладнюється процес кантування пустотілої заготовки на оправці.



а



б

Рис. 4 – Експериментальне дослідження: а – процес розкочування сталевих заготовок у гарячому стані; б – макробудова поковки по перетину

Установлені в роботі рекомендації з геометричних параметрів заготовки, інструмента й режимів розкочування є важливими науково-технічними результатами, які можна використовувати в теорії й технології процесів кування крупногабаритних пустотілих поковок.

Практичним аспектом використання результатів дослідження є вдосконалювання технологічного процесу розкочування конусних поковок зі східчастим профілем.

Висновки:

1. Встановлено, що розкочування заготовок з відносним діаметром $D_y/d_{cp} = 2,05$ з ростом ступеня деформації (ϵ) призводить до збільшення відносного діаметра уступу d_{ny}/L_n , а також до зменшення співвідношення діаметрів уступу й виступу поковки d_{nv}/d_{ny} . Більше того, підвищення конусності відбувається при зменшенні відносного діаметра виступу заготовки D_b/d_{cp} .

2. У результаті проведених макроструктурних досліджень поковок, які отримано за новою технологією, було встановлено, що при розкочуванні східчастої заготовки східчастим бойком волокна металу повторюють контур деталі, що виключає їхнє перерізання при механічній обробці.

Перелік використаних джерел:

1. Hollow Ingot: Thirty Years of Use to Control Segregation and Quality for Nuclear and Petrochemical Large Shells / G. Girardin, D. Jobard, F. Perdriset, P. Tollini, I. Poitrault, A. Gingell // Proceedings of 18th International Forgemasters Meeting. – 2011. – Pp. 170-174.
2. Method of determination of technological durability of plastically deformed sheet parts of vehicles / V. Dragobetskii, M. Zagirnyak, O. Naumova, S. Shlyk, A. Shapoval // International Journal of Engineering and Technology. – 2018. – Vol. 7, iss. 4. – Pp. 92-99. – Mode of access: <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.3.19558>.
3. Raz K. Using of a Hydraulic Press in Production and Manufacturing of Large Rings / K. Raz, K. Vaclav // Procedia Engineering. – 2014. – Pp. 1064-1069. – Mode of access: <https://doi.org/>

- [10.1016/j.proeng.2014.03.091](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.03.091).
4. A criterion for void closure in large ingots during hot forging / X-X. Zhang, Z-S. Cui, W. Chen, Y. Li // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2009. – Vol. 209 (4). – Pp. 1950-1959. – Mode of access: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.04.051>.
 5. Cechura M. Development and innovations of existing design solutions of forming machines: Research report, CK-SVT-WP11, CVTS / M. Cechura, J. Smolik. – Pilsen, 2012.
 6. Manufacturing of ultra-large diameter 20 MnMoNi 5 steel forgings for reactor pressure vessels and their properties / S. Onodera, S. Kawaguchi, H. Tsukada, H. Moritani, K. Suzuki, I. Sato // *Nuclear Engineering and Design*. – 1985. – Vol. 84, iss. 2. – Pp. 261-272. – Mode of access: [https://doi.org/10.1016/0029-5493\(85\)90196-7](https://doi.org/10.1016/0029-5493(85)90196-7).
 7. Current forging technology for integrated type steel forgings for nuclear steam supply system components / S. Kawaguchi, H. Moritani, H. Tsukada, K. Suzuki, E. Murai, I. Sato // *Nuclear Engineering and Design*. – 1984. – Vol. 81, iss. 2. – Pp. 219-229. – Mode of access: [https://doi.org/10.1016/0029-5493\(84\)90009-8](https://doi.org/10.1016/0029-5493(84)90009-8).
 8. Suzuki K. Manufacturing and material properties of ultralarge size forgings for advanced BWRPV / K. Suzuki, I. Sato, H. Tsukada // *Nuclear Engineering and Design*. – 1994. – Vol. 151, iss. 2-3. – Pp. 513-522. – Mode of access: [https://doi.org/10.1016/0029-5493\(94\)90192-9](https://doi.org/10.1016/0029-5493(94)90192-9).
 9. The development of a chill mould for tool steels using numerical modelling / M. Balcar, R. Zelezný, L. Sochor, P. Fila // *Materials and technology*. – 2008. – Vol. 42, iss. 4. – Pp. 183-188.
 10. Lee S. Effect of deformation and heat treatment on fabrication of large sized ring by mandrel forging of hollow ingot / S. Lee, Y. Lee, Y. Moon // *Materials Research Innovations*. – 2011. – Vol. 15, iss. sup 1. – Pp. s458-s462. – Mode of access: <https://doi.org/10.1179/143307511x12858957675750>.
 11. Forging of heavy products for nuclear fuel containers / A. Pastore, E. Guyot, J. Dairon, M. Lemoine // 19th International forgemasters meeting. – Makuhari, 2014. – Pp. 244-247.
 12. Markov O.E. Development of Energy-saving Technological Process of Shafts Forging Weighting More Than 100 Tons without Ingot Upsetting / O.E. Markov, M.V. Oleshko, V.I. Mishina // *Metallurgical and Mining Industry* [Online]. – 2011. – Vol. 3 (7). – Pp. 87-90. – Mode of access: <http://www.metaljournal.com.ua/assets/Uploads/attachments/87Markov.pdf>.
 13. Development of a new process for forging plates using intensive plastic deformation / O.E. Markov, A.V. Perig, M.A. Markova, V.N. Zlygoriev // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2016. – Vol. 4, № 83. – Pp. 2159-2174. – Mode of access: <http://doi.org/10.1007/s00170-015-8217-5>.
 14. Development of alternative technology of dual forming of profiled workpiece obtained by buckling / V. Kukhar, V. Burko, A. Prysiashnyi, E. Balalayeva, M. Nahnibeda // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2016. – Vol. 81, № 3. – Pp. 53-61. – Mode of access: <https://doi:10.15587/1729-4061.2016.72063>.
 15. Markov O.E. Forging of Large Pieces by Tapered Faces / O.E. Markov // *Steel in Translation*. – 2012. – Vol. 42, no. 12. – Pp. 808-810. – Mode of access: <https://doi.org/10.3103/S0967091212120054>.
 16. Zhibankov I.G. Rational parameters of profiled workpieces for an upsetting process / I.G. Zhibankov, O.E. Markov, A.V. Perig // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2014. – Vol. 72, iss. 5-8. – Pp. 865-872. – Mode of access: <https://doi.org/10.1007/s00170-014-5727-5>.
 17. A new process for forging shafts with convex dies. Research into the stressed state / O.E. Markov, A.V. Perig, V.N. Zlygoriev, M.A. Markova, A.G. Grin // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2017. – Vol. 90, iss. 1-4. – Pp. 801-818. – Mode of access: <http://doi.org/10.1007/s00170-016-9378-6>.

References:

1. Girardin G., Jobard D., Perdriset F., Tollini P., Poitault I., Gingell A. Hollow Ingot: Thirty Years of Use to Control Segregation and Quality for Nuclear and Petrochemical Large Shells. *Proceedings of 18th International Forgemasters Meeting, Market and Technical Proceedings*, Pittsburgh, 2011, pp. 170-174.

2. Dragobetskii V., Zagirnyak M., Naumova O., Shlyk S., Shapoval A. Method of determination of technological durability of plastically deformed sheet parts of vehicles. *International Journal of Engineering and Technology(UAE)*, 2018, vol. 7 (4), pp. 92-99. doi: **10.14419/ijet.v7i4.3.19558**.
3. Raz K., Vaclav K. Using of a hydraulic press in production and manufacturing of large rings. *Procedia Engineering*, 2014, vol. 69, pp. 1064-1069. doi: **10.1016/j.proeng.2014.03.091**.
4. Zhang X-X., Cui Z-S., Chen W., Li Y. A criterion for void closure in large ingots during hot forging. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, vol. 209 (4), pp. 1950-1959. doi: **10.1016/j.jmatprotec. 2008.04.051**.
5. Cechura M., Smolik J. Research report, CK-SVT-WP11, CVTS. *Development and innovations of existing design solutions of forming machines*. Pilsen, 2012.
6. Onodera S., Kawaguchi S., Tsukada H., Moritani H., Suzuki K., Sato I. Manufacturing of ultra-large diameter 20 MnMoNi 5 5 steel forgings for reactor pressure vessels and their properties. *Nuclear Engineering and Design*, 1985, vol. 84, iss. 2, pp. 261-272. doi: **10.1016/0029-5493(85)90196-7**.
7. Kawaguchi S., Moritani H., Tsukada H., Suzuki K., Murai E., Sato I. Current forging technology for integrated type steel forgings for nuclear steam supply system components. *Nuclear Engineering and Design*, 1984, vol. 81, iss. 2, pp. 219-229. doi: **10.1016/0029-5493(84)90009-8**.
8. Suzuki K., Sato I., Tsukada H. Manufacturing and material properties of ultralarge size forgings for advanced BWRPV. *Nuclear Engineering and Design*, 1994, vol. 151, iss. 2-3, pp. 513-522. doi: **10.1016/0029-5493(94)90192-9**.
9. Balcar M., Zelezný R., Sochor L., Fila P. The development of a chill mould for tool steels using numerical modelling. *Materials and technology*, 2008, vol. 42, iss. 4, pp. 183-188.
10. Lee S., Lee Y., Moon Y. Effect of deformation and heat treatment on fabrication of large sized ring by mandrel forging of hollow ingot. *Materials Research Innovations*, 2011, vol. 15, iss. sup 1, pp. s458-s462. doi: **10.1179/143307511x12858957675750**.
11. Pastore A., Guyot E., Dairon J., Lemoine M. Forging of heavy products for nuclear fuel contain-ers. *19th International forgemasters meeting*. Makuhari, 2014, pp. 244-247.
12. Markov O. E., Oleshko M. V., Mishina V. I. Development of Energy-saving Technological Process of Shafts Forging Weighting More Than 100 Tons without Ingot Upsetting. *Metalurgical and Mining Industry*, 2011, vol. 3 (7), pp. 87-90 Available at: www.metaljournal.com.ua/assets/Uploads/attachments (accessed 10 December 2020).
13. Markov O.E., Perig A.V., Markova M.A., Zlygoriev V.N. Development of a new process for forging plates using intensive plastic deformation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, vol. 83, no. 9-12, pp. 2159-2174. doi: **10.1007/s00170-015-8217-5**.
14. Kukhar V., Burko V., Prysiaznyi A., Balalayeva E., Nyhribeda M. Development of alternative technology of dual forming of profiled workpiece obtained by buckling. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2016, vol. 81, no. 3, pp. 53-61. doi: **10.15587/1729-4061.2016.72063**.
15. Markov O.E. Forging of large pieces by tapered faces. *Steel in Translation*, 2012, vol. 42, no. 12, pp. 808-810. doi: **10.3103/s0967091212120054**.
16. Zhbakov I.G., Markov O.E., Perig A.V. Rational parameters of profiled workpieces for an upsetting process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, vol. 72, iss. 5-8, pp. 865-872. doi: **10.1007/s00170-014-5727-5**.
17. Markov O.E., Perig A.V., Zlygoriev V.N., Markova M.A., Grin A.G. A new process for forging shafts with convex dies. Research into the stressed state. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, vol. 90, iss. 1-4, pp. 801-818. doi: **10.1007/s00170-016-9378-6**.

Рецензент: П.Б. Абхарі
д-р техн. наук, проф., ДДМА

Стаття надійшла 30.03.2021

OPTIMIZATION OF TECHNOLOGICAL PROCESSES OF MINERAL WASTE PROCESSING DASHKESEN ORES

The article discusses the optimization of technological processes for the processing of mineral waste from the Dashkesen ores, taking into account the dynamics of the energy intensity of operations. Methods for estimating the parameters of mathematical models by the least-squares method are presented. It has been established that the practical search for environmentally rational technological solutions can be reduced to solving problems of linear mathematical programming. The main results of optimization of technological processes are obtained in the form of equations of the optimal time for each technological operation. To search for optimal solutions and develop physical models and mathematical descriptions of optimizing waste recycling processes, the theory of graphs is used. Structural diagrams, an oriented graph and, joint matrices of adjacency of the processes of processing of mineral technological waste of Dashkesen iron ore dressing have been constructed. It has been determined that the problem of optimization of technological processes of processing of mineral waste can be formally reduced to a problem of mathematical programming. The condition for decreasing the objective function, which characterizes the energy intensity of technological operations, shows that the minimum is achieved only with a minimum of all functions included in its composition. It is indicated that the energy intensity of production can be considered a complex indicator of the technogenic impact on the environment. Energy capacity characterizes the property of an object and acts as a sign of the internal unity of the natural system. Energy intensity as an indicator of the efficiency of technological processes takes into account the consumption of energy for the production of products and waste. A calculation scheme has been drawn up to determine the optimal vector that provides the minimum energy for processing technological waste. The dependence of the ratios of the current values of energy consumption and energy consumption on the time of waste processing has been obtained. It has been confirmed that the kinetic laws of waste processing are expressed by differential equations of the first order, where, in general, the main variables are the energy intensity of technological operations and the duration of operations. The parameters of mathematical models can be estimated by the nonlinear small squares' method. The results of theoretical analysis and numerical experiments have shown that the mathematical model of technological processes for the processing and disposal of man-made mineral waste has sufficiently high adequacy.

Keywords: optimization, technological processes, waste processing, energy consumption, a mathematical model.

Керімова Г.Х. Оптимізація технологічних процесів переробки мінеральних відходів Дашкесенських руд. У статті розглядається оптимізація технологічних процесів переробки мінеральних відходів збагачення Дашкесенських руд з урахуванням динаміки енергоємності операцій. Наведено методи оцінки параметрів математичних моделей методом найменших квадратів. Встановлено, що практичний пошук екологічно раціональних технологічних рішень можна зводити до вирішення завдань лінійного математичного програмування. Основні результати оптимізації технологічних процесів отримані у вигляді рівнянь оптимального часу для кожної технологічної операції. Для пошуку оптимальних рішень та розробки фізичних моделей і математичних описів оптимізування процесів повторної обробки відходів використана теорія графів. Побудовано структурні схеми, орієнтований граф і спільні матриці

* Phd Student, senior lecturer, Azerbaijan Technical University, Baku, ekologiya.grup.85@mail.ru

суміжності процесів переробки мінеральних технологічних відходів збагачення Дашикесенських залізних руд. Визначено, що завдання оптимізації технологічних процесів переробки мінеральних відходів формально можна звести до задачі математичного програмування. Умова убування цільової функції, що характеризує енергоємність технологічних операцій, показує, що мінімум досягається лише при мінімумі всіх функцій, що входять в її склад. Зазначено, що енергоємність виробництва можна вважати комплексним показником техногенного впливу на навколишнє середовище. Енергоємність характеризує властивість об'єкта і виступає в ролі ознаки внутрішньої єдності природної системи. Енергоємність, як показник ефективності технологічних процесів, враховує споживання енергії на виробництво продукції і відходів. Складено схему розрахунку для визначення оптимального вектора, що забезпечує мінімальну енергію на переробку технологічних відходів. Отримано залежність співвідношень поточних значень споживаної енергії і енергоємності від часу переробки відходів. Підтверджено, що кінетичні закономірності переробки відходів виражаються диференціальними рівняннями першого порядку, де в загальному вигляді основні змінні – енергоємність технологічних операцій і тривалість операцій. Параметри математичних моделей можна оцінити нелінійним методом малих квадратів. Результати теоретичного аналізу і чисельних експериментів показали, що математична модель технологічних процесів переробки і утилізації техногенних мінеральних відходів має досить високу адекватність.

Ключові слова: оптимізація, технологічні процеси, переробка відходів, енергоємність, математична модель.

Description of the problem. In the enterprises of the mining industry, the processes of processing mineral waste are carried out according to rather complex technological schemes. The efficiency of such processes depends on many factors of various kinds. Among them are technological and environmental factors, as well as indicators of the level of resource deposits [1].

Analysis of recent research and publications. To search for optimal solutions and develop physical models and mathematical descriptions of optimizing waste recycling processes, the Minsker and Pigott method was used. Structural diagrams, graphs, and joint matrices were built for the production period (Fig. 1).

It turned out that the problem of optimizing waste recycling processes can be formally reduced to a mathematical programming problem. The problem of mathematical programming in a generalized form can be represented as:

$$F(x) \rightarrow \min ; \tag{1}$$

$$g_i(x) \leq 0, i = \overline{1, m} ; \tag{2}$$

$$g_j(x) = 0, j = \overline{m+1, m+n} ,$$

where $F(x)$, $g_i(x)$ functions of elements (composing) vectors – $g_j(x) - x = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$; m – the amount of inequality – prohibitions; n – the number of equations.

If multiple elements of a vector x are subdivided into non-intersecting subspecies:

$$x^{(v)}, v = \overline{1, N}, \Rightarrow x = \bigcup_{v=1}^N x^{(v)}, x^{(v)} \cap x^{(v')} = \varnothing , \tag{3}$$

then, for any $v = v'$ monotonic function of arguments, the objective function can be expressed as $f_v(x(v))$, the following tasks (1)-(2) can be formulated:

$$F(f_1(x_1^{(1)}), f_2(x_2^{(2)}), f_3(x_3^{(3)}), \dots, f_n(x_n^{(N)})) \rightarrow \min ; \tag{4}$$

$$g_{iv}(x^{(v)}) \leq 0, v = \overline{1, N}, i = \overline{1, m_v} ; \tag{5}$$

$$g_{jv}(x^{(v)}) = 0, v = \overline{1, N}, j = \overline{m_v + 1, m_v + n_v} , \tag{6}$$

where m_v – the number of limiting inequalities and the levels of input in the subgroup of variable $n_v - x(v)$. Thus, the condition of growth of the function F shows that its minimum can be only the function $f_v(x(v))$, and when the task of mathematical programming is very important at this stage is the identification of the component $x(v)$.

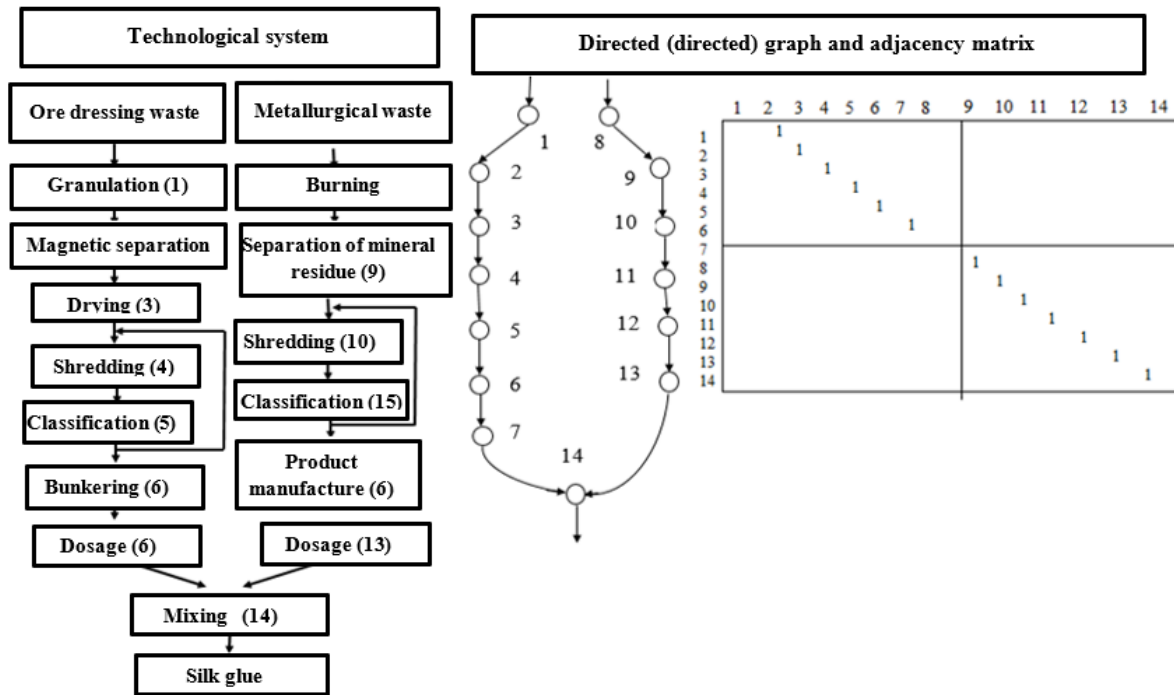


Fig. 1 – Structural schemes of technological processes of waste processing

Having studied any technological process, it is possible to confirm that, in the first approach, the speed of energy change is proportional to the difference between the speed of consumption and the speed of access from external sources. So, you can make a balance:

$$\frac{dE_i}{dt} = K_i(E_{\infty i} - E_i), \quad (7)$$

where E_i is the total amount of energy consumed to perform i – that technological operation at the moment t ; K_i – coefficient of the speed of energy consumption during execution i – that technological operation; $E_{\infty i}$ – the value of the level of energy efficiency i – that technological operation.

The zero primary condition corresponds to the equation (7) for the physical meaning of the task under consideration, then by integrating the resulting:

$$\ln[E_{\infty i}(E_{\infty i} - E_i)^{-1}] = K_i t. \quad (8)$$

Solving the equation (8) concerning E_i , the dynamics of energy efficiency i – that technological operation can be expressed:

$$E_i(t) = E_{\infty i} [1 - \exp(-K_i t)]. \quad (9)$$

Purpose of the article. Optimization of technological processes in mining should be carried out taking into account the choice of several main factors of the above. This, in turn, gives rise to the need to solve complex and time-consuming mathematical problems. Due to the wide range of physicochemical properties of mineral waste, the development and optimization of various components of the system [2, 3] are required.

Obviously, the emergence of additional requirements related to information support leads to the complication of the control system. Of course, you can reduce the number of factors taken into account, and select some of them intuitively. But in this case, the loss of useful information is possible, which can lead to errors in making environmentally sound decisions [3, 4].

Presentation of the main material. The results of the calculations, calculated according to the above-mentioned relationships are presented in fig. 2. In this case, the vector x of the parameters of the objective function (8) can be expressed as the logarithm of the energy intensity present in the equation (9). Thus, the target function will consist of linear combinations of production coefficients t_{ij} . It is clear that special and general restrictions will be associated with the continuity of t_i .

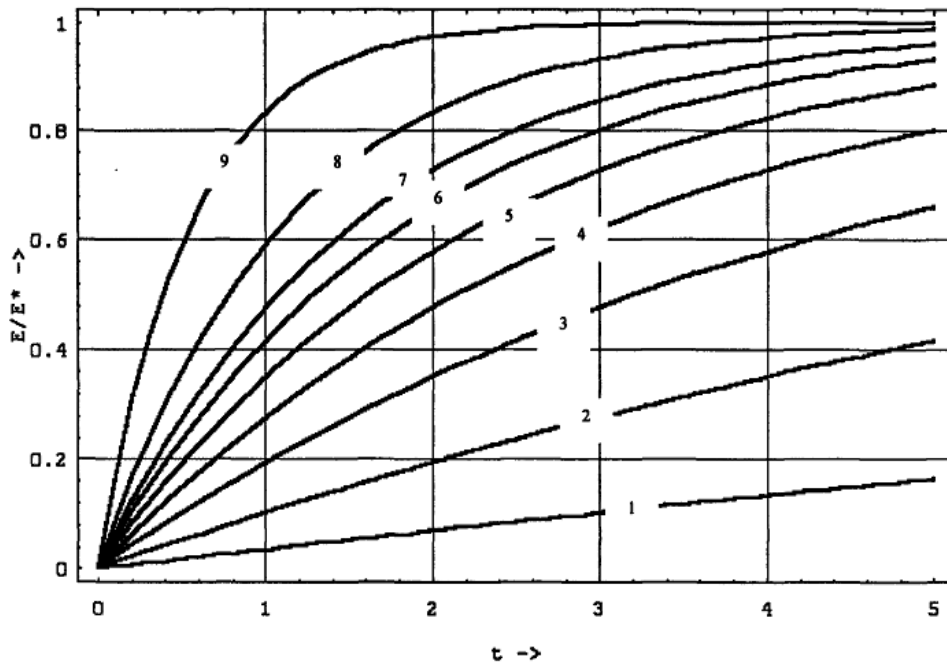


Fig. 2 – Dependence on the relationship of current values of energy consumption and energy capacity (*i*) from time (*t*)

Graphics on Fig. 2 visually demonstrate all the possible multiplicity of the solutions of the considered task of mathematical programming. The considered task of linear programming is allowed, because this task is always a minimum of one possible solution, that is, the multiplicity is not empty. The point $(t_i^0) i=1,2,3,\dots,N_{on}$ (where N is the number of technological operations in the optimized process) will characterize the optimal solution of the task and will become the point of the global minimum.

In general, the task is to minimize energy consumption for the production of mineral waste:

$$K_1t_1 + K_2t_2 + K_3t_3 + \dots + K_nt_n = F \rightarrow \min ; \tag{10}$$

$$\begin{aligned} b_{11}t_1 + b_{12}t_2 + b_{13}t_3 + \dots + b_{1n}t_n &\geq \beta_1 \\ b_{21}t_1 + b_{22}t_2 + b_{23}t_3 + \dots + b_{2n}t_n &\geq \beta_2 \\ b_{31}t_1 + b_{32}t_2 + b_{33}t_3 + \dots + b_{3n}t_n &\geq \beta_3 \\ \dots & \\ \dots & \\ b_{m1}t_1 + b_{m2}t_2 + b_{m3}t_3 + \dots + b_{mn}t_n &\geq \beta_m \end{aligned} ; \tag{11}$$

$$t_1 \geq 0, t_2 \geq 0, t_3 \geq 0, \dots, t_n \geq 0. \tag{12}$$

Thus, the tasks (7)-(9) are reduced to the task of linear programming with the help of the application of the whole function at the global minimum. The main results of optimization of technological processes can be obtained as the optimal timing for each operation. This approach allows the implementation of systemic principles in the integrated assessment of resources for environmentally rational use.

The availability of the proposed approach is relatively simple in solving the problem of optimizing technological processes. Numerous experiments have shown that to improve the quality of assessments of environmental forecasts in the results of the adopted decisions, it is necessary to create a local database of data related to the dynamics of energy consumption (Fig. 3).

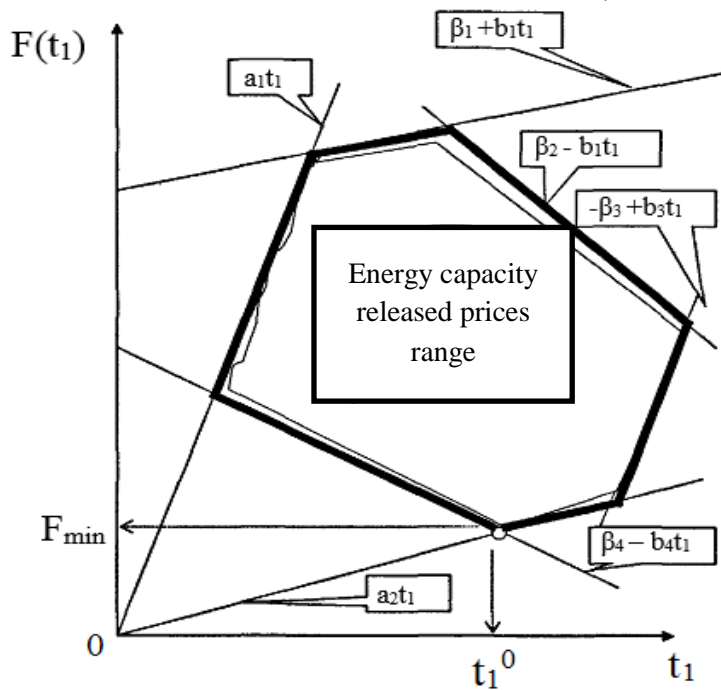


Fig. 3 – Scheme of calculation for determination of the optimal vector t_i^0 providing the minimum energy consumption for the processing of waste

It should be noted that the mathematical analysis of information about the post-processing of the waste mining industry is based on several methodological hypotheses. First of all, the means of mathematical analysis of environmental information should mimic the activity of enterprises engaged in mining. The possibility of imitation can be achieved with the help of computers.

With the help of computers, it is possible to predict the behavior of the object, depending on the conditions or other conditions that characterize the parameters of the model. It is possible to carry out some numerical experiments, changing the parameters of the model and observe the changes in the characteristics of the object.

With the help of processing the information obtained in the results of numerical experiments, it is possible to simplify mathematical models with the help of engineering formulas based on a complex primary model and a large volume of calculations.

The energy efficiency of production can be considered as a complex indicator of the impact of man-made impact on the environment, because this indicator characterizes the systemic property of the object, acting as a system, recognizing the role of recognition. A general indicator of the efficiency of technological processes – energy efficiency, because part of the energy consumed in the production of products goes to the production of waste.

The hypothesis about the possibility of interconnection between the energy capacity of technological processes and the intensity of the impact on the environment allows the use of classical mathematical apparatus for the analysis of environmental information [1].

The results of theoretical analysis and numerical experiments show that the mathematical model of the emergence and localization of waste in the mining industry is sufficiently adequate. Considering this, based on generalized indicators physically justified to use the indicator of energy efficiency for the assessment of the impact on the environment.

The kinetic regularity of output deviations is expressed with the help of differential equations of the first order. At these levels are variable – energy capacity and time. The parameters of these mathematical models can be estimated using the nonlinear method of small squares.

In the implementation of innovative technologies for repeated processing of waste, the management of the impact should be carried out with the account of real connections between all controlled factors [4].

The practical search of ecologically rational technological solutions corresponds to the solution of the problem of linear mathematical programming. The main results of the optimization of technological processes can be obtained in the form of the optimal time for each technological operation.

Conclusions

1. The task of optimization of technological processes of repeated processing of mineral waste can be formally brought to the task of mathematical programming. As the condition shows the destruction of the whole function, which characterizes the energy capacity of technological operations, the recycling of waste, its minimum can be achieved only in that case, if there will be a minimum of all functions (v) functions.

2. It is confirmed that the kinetic regularity of processing of waste is expressed in differential equations of the first order, where in general the main variables – energy efficiency of technological operations and continuity of operations. The parameters of mathematical models can be estimated by the nonlinear method of small squares.

3. The results of theoretical analysis and numerical experiments showed that the mathematical model of technological processes of processing and utilization of solid industrial waste has sufficiently high adequacy.

References:

1. Pevzner M.E. *Ekologicheskie problemy gornogo proizvodstva* [Environmental problems of mining]. Moscow, 1985, vol. 66. 154 p. (Rus.)
2. Ismailov N.Sh., Aliev M.Kh., Kerimova G.Kh. Otsenka tekhnologicheskikh otkhodov obogacheniia Dashkesenskikh zheleznykh rud [Evaluation of technological waste of Dashkesan iron ore dressing]. *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo. Obrabotka metallov davleniem – Forging and stamping production. Metal forming*, no. 8, 2020, pp. 38-45. (Rus.)
3. Əhmədov Ş.Ə., Əhmədova M.Ş. Qlobal iqlimin çoxillik dəyişmələrinin mövsümi xüsusiyyətləri və onların səbəbləri [Seasonal features of global climate change and their causes]. *Azərbaycan Mühəndislik Akademiyasının (AMA) xəbərləri – News of Azerbaijan Engineering Academy (AMA)*, 2019, no. 2, pp. 11. (Azerb.)
4. Əhmədov Ş.Ə., Hüseynova H.Ş., Əskərova N.Z. Qlobal iqlim dəyişmələrinə təsir edən mümkün səbəblər [Possible causes of global climate change]. *Azərbaycan Mühəndislik Akademiyasının (AMA) xəbərləri – News of Azerbaijan Engineering Academy (AMA)*, 2020, no. 4, pp. 122-126. (Azerb.)

Перелік використаних джерел:

1. Экологические проблемы горного производства / Под ред. М.Е. Певзнера. – М., 1985. – Вып. 66. – 154 с.
2. Исмаилов Н.Ш. Оценка технологических отходов обогащения Дашкесенских железных руд / Н.Ш. Исмаилов, М.Х. Алиев, Г.Х. Керимова // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. – 2020. – № 8. – С. 38-45.
3. Əhmədov Ş.Ə. Qlobal iqlimin çoxillik dəyişmələrinin mövsümi xüsusiyyətləri və onların səbəbləri / Ş.Ə. Əhmədov, M.Ş. Əhmədova // Azərbaycan Mühəndislik Akademiyasının (AMA) xəbərləri. – 2019. – № 2. – С. 11.
4. Əhmədov Ş.Ə. Qlobal iqlim dəyişmələrinə təsir edən mümkün səbəblər / Ş.Ə. Əhmədov, H.Ş. Hüseynova, N.Z. Əskərova // Azərbaycan Mühəndislik Akademiyasının (AMA) xəbərləri. – 2020. – № 4. – С. 122-126.

Reviewer: N.Sh. Ismailov

Dsc (Engineering), professor, Azerbaijan Technical University

The article was admitted on 15.03.2021

**APPLICATION OF EQUATIONS OF THE PLASTICITY THEORY
IN THE PROCESSES OF PROSESSING POROUS BODY PRESSURE**

In the article the results of the application of the equations of the plasticity theory in the processes of processing of the powder body pressure such as a porous sleeve were presented. The mathematical model describing the plastic behavior of a porous body is preferred. For this purpose, the hypothesis on the use of the Beltram plastic flow in the construction of a model of the plastic behavior of the porous body was used, diagrams of tangential and normal stresses and the contact surface of the body were constructed. On the basis of the Beltram hypothesis, the plasticity condition in which, the three-dimensional space of principal stresses, the equation is an ellipsoid. An equation of plastic friction of a porous powder body during re-compaction is obtained. In the case when the components of the stress deviator are known, when using certain boundary conditions, it becomes possible to find the components of the stress tensors. Testing of the processes of deformation of a porous body was carried out on cylindrical powder samples with dimensions $D \times H = 10 \times 10$ mm. after primary pressing, their relative density was $\rho = 0.68$. As a result of the experimental tests of repeated pressing of the sleeve, a graph of the dependence of the yield strength of the iron-based material on the relative density of the sleeve was built, which is in good agreement with the calculated data. Further tests carried out on the porous bushings are further compacted by pulling. The zones of plastic deformation in the powder sleeve are determined. Diagrams of normal σ and tangential τ_{rx} stresses of the tangent to the contact surface along the $r = \text{const}$ line are constructed. The proposed method for determining the stresses and plastic behavior of iron-based porous powder bushings can be used for other stationary methods of deformation of powder materials (rolling, extrusion, drawing, etc.).

Keywords: body, sleeve, theory of plasticity, stress state, normal stress, shear stress, plastic flow.

Рустамова С.М., Мамедов А.Т. Застосування рівнянь теорії пластичності пористому тілу в процесах обробки тиском. У статті представлені результати застосування рівнянь теорії пластичності до процесів обробки тиском порошкового тіла типу пористої втулки. Віддано перевагу математичній моделі, що описує пластичну поведінку пористого тіла. З цією метою використана гіпотеза про застосування пластичної течії Бельтрама при побудові моделі пластичної поведінки пористого тіла, побудовані епюри дотичної і нормальної напруг, контактної поверхні тіла. На основі гіпотези Бельтрама виражено умову пластичності, в якій в тривимірному просторі головних напруг рівняння є еліпсоїдом. Отримано рівняння пластичної течії пористого порошкового тіла при повторному ущільненні. Для випадку, коли відомі компоненти девіатора напруг, при використанні деяких граничних умов стає можливим знаходження компонентів тензорів напруг. Випробування процесів деформування пористого тіла проведено на циліндричних порошкових зразках розмірами $D \times H = 10 \times 10$ мм. Після первинного пресування їх відносна щільність становила $\rho = 0,68$. В результаті експериментальних випробувань повторного пресування втулки побудований графік залежності межі текучості матеріалу на основі заліза від відносної щільності втулки, який добре узгоджується з розрахунковими даними. Проведені випробування пористих втулок в умовах додаткового ущільнення шляхом протягування. Визначено зони пластичних деформа-

¹ Phd Student, senior lecturer, Azerbaijan Technical University, Baku, sevilrustamova70@mail.ru

² Dsc (Engineering), professor, Azerbaijan Technical University, Baku, ariff-1947@mail.ru

ції в порошковій втулці. Побудовано епюри нормальних σ , і дотичних τ_{rx} напруг дотичної на контактну поверхню уздовж $\tau = const$ лінії. Запропонований метод визначення напруг і пластичної поведінки пористих порошкових втулок на основі заліза може бути використаний при інших стаціонарних методах деформування порошкових матеріалів (прокатці, видавлюванні, волочіння і ін.). Результати повторного деформування спечених пористих втулок на основі заліза показали істотне зміцнення матеріалу після додаткової обробки.

Ключові слова: тіло, втулка, теорія пластичності, напружений стан, нормальна напруга, дотична напруга, пластична течія.

This works was supported by the Science Deelopment Foundation under the Prezident of Republic of Azerbaijan – Grant № EIF MQM – ETS – 2020 – 1(35)08/02/1-12-02.

Description of the problem. The operations of shaping and hardening - calibration, which are promising directions in the powder metallurgy, are based on plastic deformation of powder blanks. This, in many cases, by reducing the residual porosity, strengthening the base of the material and increasing the surface finish of the part, can significantly improve the performance of materials. However, for the correct execution of the processes of pressure treatment of powder materials in the process of plastic shaping, it is necessary to monitor their behavior. This, in turn, makes it necessary to build a model describing the results of experiments carried out in a plastic porous body. The main distinctive feature of the plastic deformation of the strength of the body is the presence of permanent deformation. This is mainly reflected in Poisson's ratio. The complexity of the problem posed also lies in the fact that in the process of plastic deformation, the mechanical strengthening of a porous body is caused by both a change in porosity and a change in the basic strength of the material [1].

Analysis of recent research and publications. To describe the plastic behavior of a porous body, first of all it is necessary to accept the limiting state condition and the material plasticity condition.

In the general case of the stress state, the plasticity condition is described as follows

$$f(\sigma_{ij}, S) = 0, \quad (1)$$

where $f(\sigma_{ij})$ is equation of hypersurface plasticity; σ_{ij} – component of the stress tensor; S is the relative density.

In case of plastic deformation, the condition for detecting irreversible plastic deformation can be written as follows:

$$\frac{d_f}{d\sigma_o} \neq 0, \quad (2)$$

where $\sigma_o - \sigma_o \frac{1}{3} J_1$ the ratio is the average stress related to the first invariant of the stress tensor.

Therefore, the plasticity condition for compressible bodies must include the first invariant of the stress tensor J or the average stress, then the plasticity condition of the compressible body has the following form:

$$f(J_1 J_2^1 S) = 0 \quad \text{or} \quad f(\sigma_o J_2^1) = 0, \quad (3)$$

where J_2^1 is the second invariant of the stress tensor deviator.

There are some models that, giving approximate description of the plastic behavior of a porous body in one or another step [2-6]. The more complete model is the model of a hardened porous body proposed in [6]. Here, the state of the medium is characterized by two hardening parameters - the current porosity θ and the intensity of deformations of the material base - γ . In some cases, it is difficult to determine the value of - γ Therefore, the porous body models proposed in [2-4] are of great interests, in which only one parameter is included in the plasticity condition - the current porosity or the relative density of the body. As shown in [2-4], this simplification does not lead to a significant discrepancy between the information obtained theoretically and experimentally.

In our study, we used the hypothesis of the application of the Beltram plastic state when constructing a model of the plastic behavior of a porous body [7]. On the basis of this hypothesis, the material transforms into a plastic state when the total specific deformation energy reaches a certain limit-

ing value. In this case, it is proposed that Hooke's law is valid before the onset of plasticity.

Based on the Beltram hypothesis, the plasticity condition is expressed as follows:

$$\frac{2}{3}(1 + \mu)\sigma_i^2 + 3(1 - 2\mu)\sigma_0^2 = Y^2, \quad (4)$$

where $\sigma_i = (3J_2^1)^{1/2}$ is the intensity of stress; Y is the current yield stress of the porous body in the state of linear stress.

In equation (4) Y and μ are functions of the relative density of the body.

In the three-dimensional space of the principal stresses, equation (4) is an Ellersoid. The law between the rates of deformations and stresses induced by the yield surface is expressed as follows:

$$\dot{E}_{ij} = 2\lambda[(1 + \mu)\sigma_{ij} - \delta_{ij}3\mu\sigma_0], \quad (5)$$

where \dot{E}_{ij} is strain rate tensor component; δ_{ij} – Kronecker symbol.

$$2\lambda = \frac{H_i}{\sigma_i}, \quad (6)$$

here

$$H_i = \left[\sqrt{6/2}(1 + \mu) \right] \sqrt{(\dot{E}_{ij} - \delta_{ij}\dot{E}_o)(\dot{E}_{ij} - \delta_{ij}\dot{E}_o)} \quad (7)$$

is the intensity of the deformation rate, and

$$\dot{E}_o = 1/3\delta_{ij}\dot{E}_{ij} \quad (8)$$

is the rate of volumetric deformation.

From relation (5), taking into account (6), the equation of the relationship between the components of the stress deviator and the strain rate deviator is derived:

$$S_{ij} = \frac{\sigma_i}{(1 + \mu)H_i} \dot{\ell}_{ij}, \quad (9)$$

where $S_{ij} = \sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma_0$ are the components of stress deviator; $\dot{\ell}_{ij} = \dot{E}_{ij} - \delta_{ij}\dot{E}_o$ – components of the strain rate deviator from relation (5), the following equations can be derived:

$$\delta_o = \frac{\phi}{1 - 2\mu} \sigma_i, \quad (10)$$

here $\phi = \frac{\dot{E}_o}{H_i}$.

Let's write the expression (4) in the following form

$$Y^2 = \left[\frac{2}{3}(1 + \mu) + \frac{3\phi^2}{1 - 2\mu} \right] \sigma_i^2.$$

From here

$$\sigma_i = Y \sqrt{\frac{1}{\frac{2}{3}(1 + \mu) + \frac{3\phi^2}{1 - 2\mu}}} = \omega Y, \quad (11)$$

where

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{\frac{2}{3}(1 + \mu) + \frac{3\phi^2}{1 - 2\mu}}} = \omega Y. \quad (12)$$

We express the equation of plastic flow of a porous body (9) in the following form

$$S_{ic} = \frac{\omega}{1 + \mu} \frac{Y}{H_i} \dot{E}_{ij}. \quad (13)$$

If the components of the stress deviator are known, then expressing the differential equations by balancing σ_{ij} , $c = 0$ and using some boundary conditions, one can find the components of the stress tensors. We used the considered model of a plastic porous body to determine the stresses during de-

forming broaching of bushings made of iron powder of the PZh2M3 grade. The deforming broach is a stationary process of pressure treatment of powder materials, since at any point the stress-strain state of the body is determined by its coordinates and does not depend on time.

Purpose of the article. A preliminary test of powder cylindrical samples with dimensions $D \times H = 10 \times 10$ mm was carried out. Before testing, the relative density of the samples was $\rho = 0.68$.

Compression tests were carried out on a GP-250 press. To lubricate the contact surfaces, fluoroplastic gaskets were used as a lubricant. In the process of upsetting, the diameter and height of the sample were measured, as a result, a graph was plotted $Y = Y(S)$ (Fig. 1).

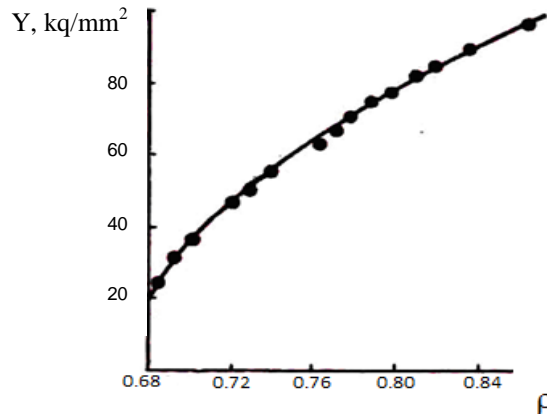


Fig. 1 – Dependence of the yield point on the relative density of the sleeve. The dependence of the coefficient on the relative density is well expressed by the following experimental relationship: $\mu = 0.5S^2$

At the next stage of the study, powder bushings with an outer diameter $D_0 = 23$ mm, an inner diameter $d_0 = 15$ mm, and a height $H_0 = 18$ mm were used. The relative density of the samples was $S_0 = 0.70$. The sleeves were prepared by cutting in the meridian plane. A coordinate sect with cell sizes was applied to the cut plane. 0.5-0.5 mm with a corundum needle on a UIM-21 instrumental microscope.

Presentation of the main material. The deformation broach was carried out in a UME-10TM machine at a speed $V_0 = 5$ mm/min. (interference $i = (d - d_0)/d_0 = 0.027$). The taper angle of the mandrel intake was $\alpha = 4$ degrees, and the width of the calibrating clip was 1.5 mm. The broaching was carried out until the sleeve grew (Fig. 2), then the deformation was stopped, the sleeves were removed from the holder, and the coordinates of the deformed nodal points of the mesh were measured using a UIM-21 microscope. Figure 2 shows the boundaries of deformation zones during a deforming broach that changes its direction.

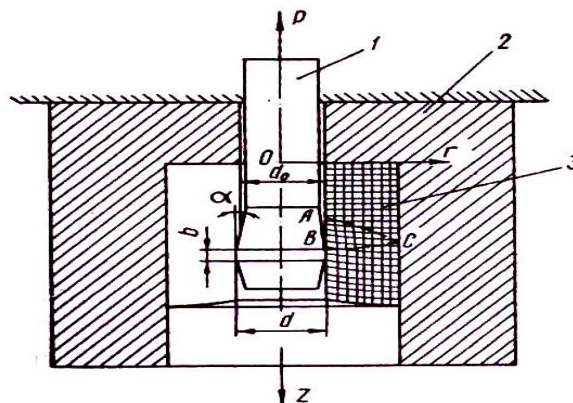


Fig. 2 – Chipping deforming holes in the powder sleeve: 1 – mandrel; 2 – clip; 3 – sleeve; ABC – plastic deformation zone

Using the following ratio, we found the relative density

$$S = S_0 \frac{W_0}{W}, \quad (14)$$

where W_0 is the volume before the deformation of the annular element formed by the rotation of the grid cell around the axis of the sleeve; W is the volume of the deformed annular element.

The rate of change of the location of the leaks in the direction is determined using the flow function.

$$V_r = \frac{1}{r} \frac{d\psi}{dz} \frac{S_0}{S}; \quad V_z = -\frac{1}{r} \frac{d\psi}{dr} \frac{S_0}{S}, \quad (15)$$

where r and z are coordinates of points, in them the velocities V_r and V_z are determined; S is the relative density at this point; $\psi = 1/2\pi Q$, Q is the flow function, and $Q = S_0 V_0$ is the volume of the substance passing through the annular surface in unit time.

$S_0 = \pi(r_{oj}^2 - r_0^2)$, where j is the ordinal number of the flow line determined by the coordinates of the point; r_{oj} is the distance before the flow line arrives from the bushing axis to the deformation center; $r_0 = d_0/2$ – inner radius of the undeformed part of the sleeve. Then the calculations were carried out in the nodes of the computational grid with a step of 0.5 mm, superimposed on the figure of the deformed coordinate grid. S and ψ were determined by line interpolation at the nodal points of the regular grid. The found values of the relative densities S were used to find Y and μ .

The tensor components of the strain rates were determined by the following relation

$$\dot{E}_0 = \frac{dV_r}{d_r}; \quad \dot{E}_z = \frac{dV_z}{d_z}; \quad \dot{E}_r = \frac{V_r}{r}; \quad \dot{E}_{rz} = \frac{dV_z}{d_r} + \frac{dV_r}{d_z}. \quad (16)$$

$$\dot{l}_r = \dot{E}_r - \dot{E}_0; \quad \dot{l}_z = \dot{E}_z - \dot{E}_0; \quad \dot{l}_\theta = \dot{E}_\theta - \dot{E}_0, \quad (17)$$

here, $\dot{E}_0 = \frac{1}{3}(E_r + E_z + E_\theta)$ is the rate of volumetric deformation.

Then the components of the stress deviator were determined S_r, S_z, S_θ . For axisymmetric deformation, relation (13) takes the following form.

$$S_r = \frac{\omega}{(1+\mu)} \frac{Y}{H_i} \dot{l}_r; \quad S_z = \frac{\omega}{(1+\mu)} \frac{Y}{H_i} \dot{l}_z; \\ S_\theta = \frac{\omega}{(1+\mu)} \frac{Y}{H_i} \dot{l}_\theta; \quad \tau_{rz} = \frac{\omega}{2(1+\mu)} \frac{Y}{H_i} \dot{\eta}_{rz}, \quad (18)$$

here

$$H_i = \frac{\sqrt{2}}{2(1+\mu)} \sqrt{(\dot{E}_r - \dot{E}_z)^2 + (\dot{E}_z - \dot{E}_\theta)^2 + (E_\theta - E_r)^2 + \frac{3}{2}\eta_{rz}^2}. \quad (19)$$

Let us write down the relations

$$\sigma_r = S_r + \sigma_\theta; \quad \sigma_z = S_z + \sigma_\theta; \quad \sigma_\theta = S_\theta + \sigma_\theta. \quad (20)$$

To determine the average stresses σ_θ in the deformation zone, we use the differential stability equations

$$\frac{d\sigma_r}{d_r} + \frac{d\tau_{rz}}{d_z} + \frac{\sigma_z - \sigma_\theta}{r} = 0; \quad \frac{d\tau_{rz}}{d_r} + \frac{d\sigma_z}{d_z} + \frac{\tau_{rz}}{r} = 0; \quad (21)$$

after substitution of relation (20), they obtain the following form

$$\frac{d\sigma_\theta}{d_r} + \frac{dS_r}{d_z} + \frac{d\tau_{rz}}{d_z} + \frac{S_r - S_\theta}{r} = 0; \quad \frac{d\sigma_\theta}{d_z} + \frac{dS_z}{d_z} + \frac{d\tau_{rz}}{d_r} + \frac{\tau_{rz}}{r} = 0. \quad (22)$$

Accordingly, integrating Eqs. (22) in the direction of the r and z axes and using the boundary condition at point A to be the radial stress σ_r equal to zero, we can find the average stresses σ_θ , and then using relations (20), we find the stresses $\sigma_r, \sigma_z, \sigma_\theta$. During deforming pulling, the stresses were calculated on a computer. When calculating random derivatives at the nodes of a regular grid, the finite difference method was used. Numerical integration was performed based on the Simpson formula [8, 9].

Figure 3 shows the diagrams of normal Q_r and tangential τ_{rz} stresses along the $r = \text{constant}$ con-

tact line of the tangential contact surface. Normal stresses in the direction of the z axis grow rapidly and get the highest values at the exit of the deformation zone. Shear stresses are also exposed to the highest values at the exit of the deformation zone.

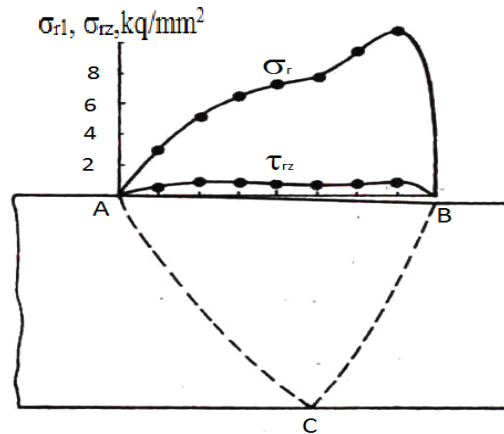


Fig. 3 – Diagrams of normal σ_r and tangential τ_{rz} stresses tangent to the contact surface along the $r = \text{const}$ line

Due to the smallness of the angle α , these stresses at the first approximation can be considered contact deformations. Consequently, there is no proportional relationship between the contact normal and shear stresses. Therefore, when calculating the energy-power parameters of the process, it is necessary to give an advantage to the law of friction not according to Coulomb, but according to Sieber.

The proposed method for determining stresses can be used for other stationary methods of processing powder materials by pressure (rolling, extrusion, drawing, and others).

Conclusions

1. The model based on Beltram's hypothesis on the use of the plastic state of a plastic porous body was presented and a control that connects stresses and strain rates was derived.

2. The method was developed for determining stresses in stationary processes of pressure treatment of powder materials, based on the use of a coordinate grid and the obtained equations of plastic flow of a porous body to find the region of deformation rates. The method is applied to calculate stresses during deforming broaching of holes in porous bushings obtained by cold pressing by intermediate sintering from iron powder PZh2M3.

References:

1. Malinin N.N. *Prikladnaia teoriia plastichnosti i polzuchesti* [Applied theory of plasticity and creep]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1975. 399 p. (Rus.)
2. Grin R.Dzh. *Teoriia plastichnosti poristykh tel* [The theory of plasticity of porous bodies]. *Mekhanika – Mechanics*, 1973, no. 4, pp. 109-121. (Rus.)
3. Kuhn H.A. Deformation characteristics and plasticity theory of sintered powder. *International Journal of Powder Metallurgy*, 1971, vol. 7, iss. 1, pp. 15-25.
4. Kun Kh.A. *Osnovnye printsipy shtampovki poroshkovykh zagotovok. V kn.: Poroshkovaia metallurgiiia materialov spetsial'nogo naznacheniiia* [Basic principles of stamping powder blanks. In the book: Powder metallurgy of special-purpose materials]. Moscow, Metallurgiiia Publ., 1977. Pp. 143-158. (Rus.)
5. Martynova I.F., Skorokhod V.V. *Osobennosti neobratimoi deformatsii spechennogo poristogo tela iz uprochniaiushchegosia plasticheskogo metalla* [Features of irreversible deformation of a sintered porous body made of a hardening plastic metal]. *Poroshkovaia metallurgiiia – Powder metallurgy*, 1977, no. 4, pp. 70-74. (Rus.)
6. Martynova I.F., Shtern M.B. *Uравнение plastichnosti poristogo tela, uchityvaiushchee istinnye deformatsii materiala osnovy* [The equation of plasticity of a porous body, taking into account the

- true deformations of the base material]. *Poroshkovaia metallurgiiia – Powder metallurgy*, 1978, no. 1, pp. 23-29. (Rus.)
7. Storozhev M.V., Popov E.A. *Teoriia obrabotki metallov davleniem* [Theory of metal forming]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1977. 423 p. (Rus.)
 8. Məmmədov A.T., Əliyev Ç.A. Kiçik hündürlüklü boruların ştamplama üsülü ilə komponentlərdən alınmasının bəzi kəmiyyətlərin hesabı [Report on some quantities of stamping of small height pipes from components]. *Maşınşunaslıq – Mechanical Engineering*, 2015, no. 1, pp. 21-23. (Azerb.)
 9. Guter R.S., Ovchinskii B.V. *Elementy chislenogo analiza i matematicheskaia obrabotka rezul'tatov opyta* [Elements of numerical analysis and mathematical processing of experimental results]. Moscow, Nauka Publ., 1970. 432 p. (Rus.)

Перелік використаних джерел:

1. Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести / Н.Н. Малинин. – М. : Машиностроение, 1975. – 399 с.
2. Грин Р.Дж. Теория пластичности пористых тел / Р.Дж. Грин // *Механика*. – 1973. – № 4. – С. 109-121.
3. Kuhn H.A. Deformation characteristics and plasticity theory of sintered powder materials / H.A. Kuhn, C.L. Downey // *International Journal of Powder Metallurgy*. – 1971. – Vol. 7, iss. 1. – Pp. 15-25.
4. Кун Х.А. Основные принципы штамповки порошковых заготовок. В кн.: Порошковая металлургия материалов специального назначения // Х.А. Кун. – М. : Металлургия, 1977. – С. 143-158.
5. Мартынова И.Ф. Особенности необратимой деформации спеченного пористого тела из упрочняющегося пластического металла / И.Ф. Мартынова, В.В. Скороход // *Порошковая металлургия*. – 1977. – № 4. – С. 70-74.
6. Мартынова И.Ф. Уравнение пластичности пористого тела, учитывающее истинные деформации материала основы / И.Ф. Мартынова, М.Б. Штерн // *Порошковая металлургия*. – 1978. – № 1. – С. 23-29.
7. Сторожев М.В. Теория обработки металлов давлением / М.В. Сторожев, Е.А. Попов. – М. : Машиностроение, 1977. – 423 с.
8. Məmmədov A.T. Kiçik hündürlüklü boruların ştamplama üsülü ilə komponentlərdən alınmasının bəzi kəmiyyətlərin hesabı / A.T. Məmmədov, Ç.A. Əliyev // *Maşınşunaslıq*. – 2015. – № 1. – Səh. 21-23.
9. Гутер Р.С. Элементы численного анализа и математическая обработка результатов опыта / Р.С. Гутер, Б.В. Овчинский. – М. : Наука, 1970. – 432 с.

Reviewer: N.Sh. Ismailov

Dsc (Engineering), professor, Azerbaijan Technical University

The article was admitted on 05.03.2021

**ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА
ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА**

УДК 621.316.11:621.67

doi: 10.31498/2225-6733.42.2021.240665

© Лисяк В.Г.¹, Олійник М.Й.²**МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ АСИНХРОННОГО
ЕЛЕКТРОПРИВОДУ З ВІДЦЕНТРОВИМ НАСОСНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ**

Проведено огляд та аналіз різних підходів до моделювання режимів роботи асинхронного електроприводу з відцентровими агрегатами насосних станцій. Показано, що сучасні дослідження з цієї тематики переважно зосереджені або на системах керування електроприводу насосів, або на гідравлічній підсистемі, або на оптимізації енергетичних та економічних макропоказників режимів роботи насосних станцій в цілому. Запропоновано математичну модель динамічних режимів роботи асинхронного електроприводного відцентрового насосного агрегату з трубопроводом, у якій зі збалансованим ступенем деталізації представлено електромеханічну та гідравлічну підсистеми. Проведено тестування розробленої моделі шляхом комп'ютерного симулювання низки експлуатаційних та аварійних режимів.

Ключові слова: математична модель, асинхронна машина, відцентровий насос, гідравлічна мережа.

V.H. Lysiak, M.Y. Oliinyk. Simulation of dynamic operating modes of asynchronous electric drive with centrifugal pump load. A review and analysis of different approaches to modelling the operating modes of an asynchronous electric drive with centrifugal units of pumping stations has been performed. It has been shown that modern researches of this subject are mainly focused either on the control systems of the electric drive of pumps, or on the hydraulic subsystem, or on the optimization of energy and economic macro indicators of pumping stations in general. As a rule, in most works only one of the subsystems of the pumping station is modelled in an expanded form: either electromechanical or hydraulic; the other one is usually presented in a very simplified way (by approximating the experimentally obtained tabular data). This significantly limits the ability to study efficiently the physical processes that take place simultaneously in these inextricably linked subsystems, and extends the range of the proper specialists involved in solving relevant tasks. One way to solve this problem may be to develop a mathematical model in which both subsystems would be presented with a comparable level of detailing. The paper proposes a mathematical model of dynamic operating modes of an asynchronous electric centrifugal pump unit with a pipeline, in which the electromechanical and hydraulic subsystems are presented with a balanced level of detailing. The equations of the mathematical model are formed in orthogonal d-q coordinates rigidly connected to the rotor of the asynchronous machine in relative units using a system of basic quantities and are solved with respect to the first derivatives. The proposed model can be used for analyzing the operating modes of the existing high-capacity pumping stations and their power supply systems without making physical experiments, and for designing new facilities as well.

Keywords: mathematical model, asynchronous machine, centrifugal pump, hydraulic network.

¹ канд. техн. наук, доцент, Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, ORCID: 0000-0002-8371-6455, vladyslav.h.lysiak@lpnu.ua

² канд. техн. наук, доцент, Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, ORCID: 0000-0003-0285-1872, mykhailo.y.oliinyk@lpnu.ua

Постановка проблеми. Потужні насосні станції є стратегічно важливими об'єктами, які споживають значну кількість електроенергії [1]. Незважаючи на переважання квазістаціонарних режимів роботи (до них можна віднести тривалі режими великих розподільчих і магістральних станцій, координати яких змінюються дуже повільно в часі [2] внаслідок незначних змін витрат рідини), планові увімкнення (вимкнення) окремих насосних агрегатів, а також аварійні процеси можуть супроводжуватись багатократно підвищеним енергоспоживанням [3] та імовірністю пошкоджень. Враховуючи стратегічне значення таких потужних об'єктів, а також велику вартість (а нерідко – й неможливість) зупинки для проведення фізичних експериментів, оптимальним шляхом їх дослідження залишається комп'ютерне симулювання, що потребує відповідних інструментів. Загальновідомо, що асинхронні машини (АМ) переважають серед усього приводу, зокрема – відцентрових насосів (ВН); тому питання моделювання таких систем з метою досягнення їхньої максимальної енергоефективності залишаються актуальними.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Потужну систему перекачування рідини можна представити як сукупність двох підсистем різної фізичної природи: гідравлічної (ВН з трубопроводами (ТП)) та електромеханічної: система електропостачання регульованого електроприводу ВН, які нерозривно пов'язані між собою. Тому вбачається доцільним застосування комплексного підходу до моделювання таких об'єктів. На прикладі робіт, наведених нижче, на сьогодні можна виділити наступні основні напрямки сучасних досліджень систем перекачування рідини. Перша група – роботи, присвячені оптимізації макропоказників насосних станцій або їхніх каскадів в цілому [3, 4]. До другої групи можна віднести праці, в яких детально розглядається лише одна з підсистем насосної станції: електромеханічна [2, 5, 6] чи гідравлічна [7, 8], інша ж підсистема моделюється спрощено. Специфічним напрямком є розроблення спеціалізованих моделей для дослідження окремих показників, зокрема діагностики пошкоджень [9-11]; нерідко використовується імітаційне моделювання (напр., [8, 11]), яке, незважаючи на свою ефективність, не дає розуміння фізичної сутності процесів. Окрема група робіт присвячена моделюванню усталених режимів [12-14]. Так, у [13] на основі узагальненої моделі [14] розроблено систему керування усталеними режимами електротехнічного комплексу насосної станції. Остання група, яку доцільно виділити серед інших, це роботи, в яких наведені моделі динамічних режимів систем електропривод – ВН з високою деталізацією математичного опису кожної з підсистем [15, 16]. На нашу думку, спільним для всіх наведених прикладів досліджень є недостатність загального уніфікованого підходу до побудови моделі системи перекачування рідини.

Метою даної роботи є побудова на засадах уніфікованого підходу математичної моделі динамічних режимів асинхронного електроприводу з відцентровим насосним навантаженням (АЕВН), яка давала би змогу зі співставною деталізацією досліджувати процеси, які одночасно відбуваються у гідравлічній та в електромеханічній підсистемах як у цілому, так і в їхніх конструктивних елементах зокрема.

Виклад основного матеріалу. Для побудови математичної моделі рівняння записуємо у відносних одиницях із використанням характерної кожної з них підсистем АЕВН системи базових величин. З метою уніфікації моделі рівняння сформовані в жорстко зв'язаних зі спільним валом АЕВН ортогональних $d-q$ координатах. На рисунку 1 представлена схема сполучень електромеханічної та гідравлічної підсистем АЕВН.

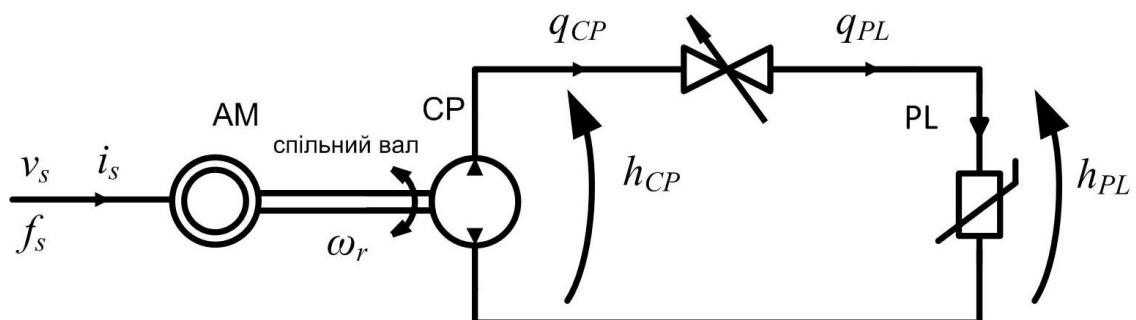


Рис. 1 – Структурна схема АЕВН

Рівняння моделі АМ сформовані на підставі узагальнених рівнянь електромеханічного перетворювача з урахуванням таких припущень: температурний режим є усталеним, параметри обмоток зосереджені; вебер-амперна характеристика магнітної системи є нелінійною, вплив форми осердя на розподіл магнітного поля не враховується. Рівняння сформовані з використанням такої системи базових величин:

$$\omega_{im,b} = \omega_s; V_{im,b} = \sqrt{2/3} V_{im,nom}; T_{im,b} = S_{im,b} / \omega_{im,b} = P_{im,nom} / (\eta_{im,nom} \cos \varphi_{im,nom} \omega_{im,nom});$$

$$Z_{im,b} = V_{im,b} / I_{im,b} = V_{im,nom}^2 \eta_{im,nom} \cos \varphi_{im,nom} \omega_{im,nom} / P_{im,nom},$$

де $\omega_s, V_{im,nom}, P_{im,nom}, \eta_{im,nom}, \cos \varphi_{im,nom}$ – номінальні паспортні параметри АМ. За основу взято запропоновану в [17] модель насиченої АМ, особливістю якої є врахування насичення у вигляді залежного від потокозчеплення нелінійного магнітного опору її головного магнітного кола.

Для формування рівнянь гідравлічної підсистеми за основу взято наведену в [18] математичну модель ВН з трубопроводом, сформовану на базі представленої в [19, 20] моделі, що базується на принципі електрогідродинамічної аналогії, з урахуванням таких припущень: температурний режим роботи є усталеним, робоча рідина є нестисливою та однорідною. Це дає можливість дослідження роботи як в цілому ВН та ТП, так і основних їхніх внутрішніх конструктивних елементів з урахуванням впливу фізичних параметрів робочої рідини та режимів її pompування. Рівняння сформовані з використанням наступної системи базових величин:

$$\omega_{cp,b} = \omega_{cp,nom}; H_{cp,b} = H_{cp,nom}; Q_{cp,b} = Q_{cp,nom};$$

$$T_{cp,b} = S_{cp,b} / \omega_{cp,b} = \rho g H_{scp,b} Q_{scp,b} / \omega_{cp,b}; Z_{p,b} = \rho g H_{cp,b} / Q_{cp,b},$$

де $\omega_{cp,nom}, H_{cp,nom}, Q_{cp,nom}$ – номінальні паспортні параметри ВН, ρ, g – густина робочої рідини та пришвидшення вільного падіння. Механічний момент T_m опору гідравлічної підсистеми з урахуванням дисипативних втрат енергії на вентилювання та тертя в підшипниках представлений з урахуванням наступних припущень: температурний режим є усталеним, вважаємо абсолютно жорсткими ротор АМ, робоче колесо ВН та спільний вал. За базове значення частоти, спільне для обох підсистем, приймаємо базове значення частоти АМ: $\omega_b = \omega_{im,b}$.

Загальну математичну модель АЕВН сформовано з описаних вище моделей її підсистем. Для зручності при її використанні у системах комп'ютерної математики рівняння розв'язані відносно перших похідних. Рівняння (1) описує електромеханічну, а рівняння (2), (3) і (4) – гідравлічну підсистеми. Зокрема, рівняння (4) встановлює згідно [19] виконання умови колінеарності зображальних векторів дійсного напору та дійсної витрати на виході ВН. Рівняння (5) руху спільного вала АЕВН об'єднує електромеханічні та гідравлічні координати режиму АМ та ВН.

$$\begin{pmatrix} d\mathbf{i}_s/dt \\ d\mathbf{i}_r/dt \\ d\psi_\delta/dt \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -R_s/L_{\sigma s} - j\omega_s & 0 & -1/L_{\sigma s} & -j\omega_s/L_{\sigma s} \\ 0 & -\omega_s R_r/L_{\sigma r} - j(\omega_s - \omega_r) & -\omega_s/L_{\sigma r} & j(\omega_s - \omega_r)/L_{\sigma r} \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & -R_m(\psi_\delta) - j\omega_s/R_a \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \mathbf{i}_s \\ \mathbf{i}_r \\ \mathbf{e}_\delta \\ \psi_\delta \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \mathbf{v}_s \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}; \quad (1)$$

$$\begin{pmatrix} dq_{11}/dt \\ dq_{22}/dt \\ dq_{33}/dt \\ dq_{44}/dt \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_{11}/L'_{11} - r_{21}/L'_{12} & r_{22}/L'_{12} - r_{32}/L'_{13} & r_{33}/L'_{13} - r_{23}/L'_{12} & 0 \\ r_{11}/L'_{21} - r_{21}/L'_{22} & r_{22}/L'_{22} - r_{32}/L'_{23} & r_{33}/L'_{23} - r_{23}/L'_{22} & 0 \\ r_{11}/L'_{31} - r_{21}/L'_{32} & r_{22}/L'_{32} - r_{32}/L'_{33} & r_{33}/L'_{33} - r_{23}/L'_{32} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -r_{mech}(q_L)/L_{mech} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \mathbf{q}_{11} \\ \mathbf{q}_{22} \\ \mathbf{q}_{33} \\ \mathbf{q}_{44} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -1/L'_{11} \\ -1/L'_{21} \\ -1/L'_{31} \\ 1/L_{mech} \end{pmatrix} \times \mathbf{h}_0; \quad (2)$$

$$\frac{dq_L}{dt} = -\frac{r_L}{L_{L1}} q_L + \frac{1}{L_L} h_L - \frac{1}{L_L} h_{st}; \quad (3)$$

$$h_{Ld}q_{33q} - h_{Lq}q_{33d} = 0; \quad (4)$$

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J_{\Sigma}\omega_b} \left(T_{sm,b} (\Psi_{\delta d} i_{sq} - \Psi_{\delta q} i_{sd}) - T_{cp,b} H_{0,nom} \omega_r \frac{\omega_b}{\omega_{cp,b}} \sqrt{(q_{11d} + q_{44d})^2 + (q_{11q} + q_{44q})^2} - \Delta T_{m0} \omega_r^2 \right), \quad (5)$$

де t – час; ω_s, ω_r – колова частота напруги обвитки статора АМ та колова частота обертання спільного з ВН вала; $\mathbf{v}_s = (v_{sd}, v_{sq})_t$, $\mathbf{i}_s = (i_{sd}, i_{sq})_t$, та $\mathbf{i}_r = (i_{rd}, i_{rq})_t$ – напруга і струм статора, а також зведений до обмотки статора струм ротора АМ; $\Psi_{\delta} = (\Psi_{\delta d}, \Psi_{\delta q})_t$ – зведене до обвитки статора потокозчеплення від магнітного потоку повітряного проміжку АМ; $R_s, L_{\sigma s}, R_r, L_{\sigma r}$ – активні опори та індуктивності розсіяння статора та зведені до статора активні опори та індуктивності розсіяння ротора АМ відповідно; R_a – еквівалентний опір, який враховує втрати активної енергії у сталевому осерді АМ; $\mathbf{h}_0 = \omega_r^2 H_{0,nom} (\omega_b / \omega_{cp,b})^2 (\cos(\omega_r \omega_b t + \Psi_{0cp}) + j \sin(\omega_r \omega_b t + \Psi_{0cp})) = h_{0d} + j h_{0q}$ – зображальний вектор фіктивного напору $h_0 = \sqrt{h_{0d}^2 + h_{0q}^2}$ ($H_{0,nom}$ – номінальне значення, Ψ_{0cp} – довільне) ідеалізованого ВН [18, 19]; $\mathbf{h}_L = h_{Ld} + j h_{Lq}$ – зображальний вектор дійного напору $h_L = \sqrt{h_{Ld}^2 + h_{Lq}^2}$ на виході ВН; h_{st} – статичний протинапір ТП; $\mathbf{q}_L = q_{33d} + j q_{33q}$ – зображальний вектор об’ємної витрати рідини $q_L = \sqrt{q_{33d}^2 + q_{33q}^2}$ на виході ВН; $\mathbf{q}_{11}, \mathbf{q}_{22}, \mathbf{q}_{33}, \mathbf{q}_{44}$ – зображальні вектори інших витрат заступної схеми ВН; $r_{mech}(q_L)$ – еквівалентний нелінійний опір, який враховує дисипативні втрати механічної енергії у ВН залежно від режиму її помпуння [21]; $r_{11} = r_{12} = R_{\mu Q,nom}$; $r_{22} = r_{23} = R_{\Delta Q,nom}$; $r_{33} = R_{\Delta Q,nom} + R_{\Delta H,nom}$; $L'_{11} = (L_{12} L_{21} / (L_{11}^2 L'') - 1 / L_{11})^{-1}$; $L'_{22} = L''$; $L'_{33} = (L_{32} L_{23} / (L_{33}^2 L'') - 1 / L_{33})^{-1}$; $L'_{12} = L'_{21} = L_{11} L' / L_{12}$; $L'_{13} = L'_{31} = L_{11} L_{33} L' / (L_{12} L_{23})$; $L'_{23} = L'_{32} = L_{33} L' / L_{23}$, де $L'' = L_{12} L_{21} / L_{11} - L_{22} + L_{23} L_{32} / L_{33}$, де $L_{11} = L_{t,nom} + L_{\mu H,nom} + L_{\mu Q,nom}$; $L_{12} = L_{21} = L_{\mu Q,nom}$; $L_{23} = L_{32} = L_{\Delta Q,nom}$; $L_{33} = L_{\Delta Q,nom} + L_{\Delta H,nom}$; $L_{22} = L_{\mu Q,nom} + L_{\Delta Q,nom}$; r_L, L_L – інші еквівалентні дисипативні гідроопори та гідроіндуктивності ВН і ТП; $T_e = \Psi_{\delta d} i_{sq} - \Psi_{\delta q} i_{sd}$, T_m – крутний електромагнітний момент двигуна та механічний момент опору виконавчого механізму відповідно; $\Delta T_0 \omega_r^2$; ΔT_0 – за відсутності інших даних приймаємо рівним 0,02; J_{Σ} – сумарний момент інерції АЕВН, кг·м². Нелінійний статичний магнітний опір головного магнітного кола АМ представлено у вигляді апроксимаційного полінома $R_m(\Psi_{\delta}) = I_{mn} (a_0 + a_2 (\Psi_{\delta d}^2 + \Psi_{\delta q}^2) + a_4 (\Psi_{\delta d}^2 + \Psi_{\delta q}^2)^4)$, де $a_0 = 0,82$; $a_2 = 0,148$; $a_4 = 0,044$; $I_{mn} = 1 / (x_{\sigma} + x_a)$, де x_{σ}, x_a – відносні індуктанси розсіяння та намагнічення АМ в номінальному режимі [22]. В даному випадку нехтуємо впливом частоти на R_m , оскільки він стає суттєвим при частотах більше 100 Гц [23].

Слід зазначити, що в наведені рівняння та вирази входять відносні значення параметрів АМ та ВН; виняток складає лише сумарний момент інерції J_{Σ} , кг·м². Розрахунок параметрів гідроопорів та гідроіндуктивностей ВН детально висвітлений у [19, 21].

Для тестових розрахунків було обрано ВН типу 14НДс-Н та АМ типу 4АН355М6У3 (їх параметри наведені в таблицях 1 і 2). Момент інерції J_{Σ} сполученої абсолютно жорстким валом системи АМ–ВН складав 10,5 кг·м².

Таблиця 1

Параметри АМ типу 4АН355М6У3

P_{nom} , kW	η_{nom}	$V_{s,nom}$, V	n_{nom} , rpm	$\cos\varphi_{nom}$	T_{max}^*	T_{min}^*	T_s^*	I_s^*	p_0	R_s^*	L_s^*	R_r^*	L_r^*	R_a^*
250	0,935	380	985	0,9	2,2	0,9	1,4	7	3	0,0277	0,1274	0,0543	0,4459	52,5

Тестування розробленої моделі здійснювалось в системі Mathcad шляхом комп’ютерного симулювання низки експлуатаційних та аварійних режимів. Окремі результати комп’ютерного

симулювання наведені на рисунках 2-7. У початковий момент часу відбувався прямий пуск агрегату АМ-ВН із закритою засувкою на виході ВН. Після стабілізації частоти обертання спільного вала в момент часу 1 с починалось плавне (протягом 0,5 с, за лінійним законом) відкриття цієї засувки. На 8-й секунді симулювався початок аварійного режиму повної несиметричності живлення АМ, після чого з 15-ї секунди – відновлення нормального режиму роботи. У момент часу 20 с протягом 0,1 с моделювалась повна розгерметизація місця з'єднання ВН з ТП, а в момент часу 25 с протягом 0,5 с за лінійним законом – закриття засувки з метою припинення аварійного витoku рідини.

Таблиця 2

Параметри ВН типу 14НДс-Н

H_{nom} , m	Q_{nom} , m ³ /h	H_{max} , m	Q_{max} , m ³ /h	η_{nom} ,	n_{nom} , rpm	$P_{hydr-nom}$, kW	$H_{0.nom}$ *	$R_{\Delta Q}$ *	$L_{\Delta Q}$ *	$R_{\Delta H}$ *	$L_{\Delta H}$ *	L_t *	$L_{\mu H}$ *	$L_{\mu Q}$ *	R_{mech} *	L_{mech} *
45	1260	50,16	3518	0,809	980	154	1,302	29,47	9,49	$6,627 \cdot 10^{-4}$	0,4144	0,00876	0,0352	0,2375	7,180	0,02287

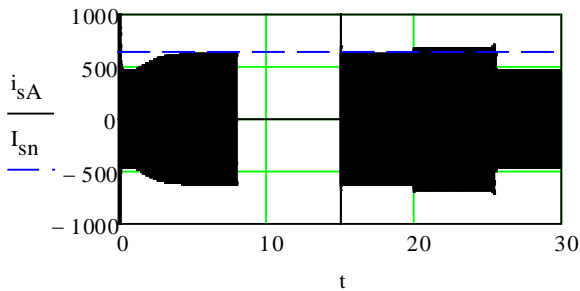


Рис. 2 – Струм фази А статора АМ, А

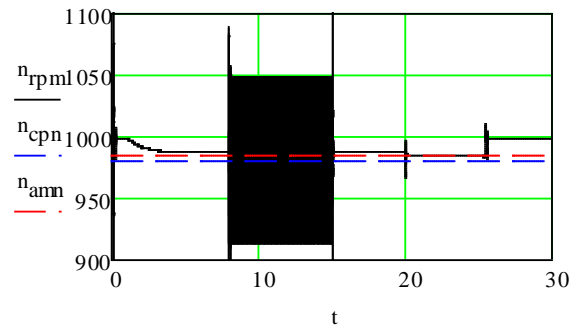


Рис. 3 – Швидкість обертання спільного вала, об/хв

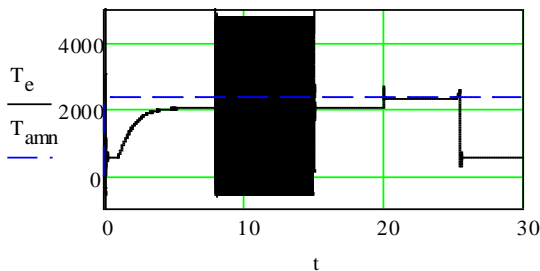


Рис. 4 – Електромагнітний момент АМ, Н·м

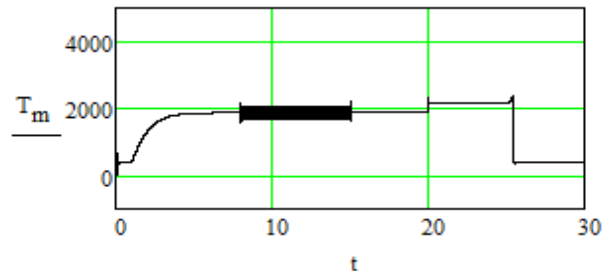


Рис. 5 – Механічний момент опору ВН, Н·м

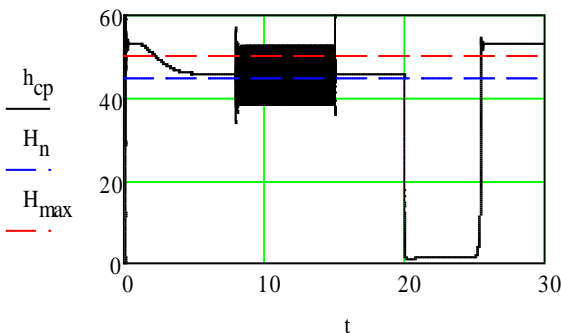


Рис. 6 – Напір робочої рідини ВН, м

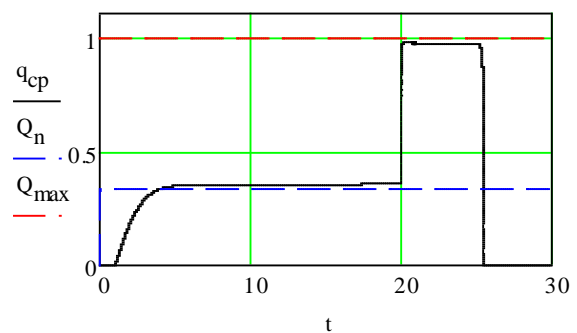


Рис. 7 – Об'ємна витрата робочої рідини ВН, м³/с

Для перевірки коректності моделі на рисунках наведені паспортні показники ВН (номінальний напір, максимальний напір в режимі повністю перекритої засувки на виході, а також об'ємна витрата в режимі повного обриву трубопроводу). Слід зазначити, що залежні від частоти обертання робочого колеса паспортні показники ВН задані для номінальної частоти; в інших режимах за інших частот обертання вони відрізняються від заданих. Крім цього, на графіки додані амплітудне значення номінального струму АМ, обчислене за її паспортними даними, номінальне значення крутного електромагнітного моменту (за номінальної частоти та потужності), а також номінальні значення частот обертання АМ і ВН.

Висновки

Розроблено математичну модель динамічних режимів потужного асинхронного електроприводу з відцентровим насосним навантаженням. Співставний рівень деталізації математичного опису гідравлічної та електромеханічної підсистем уможливило одночасне дослідження як процесів, що відбуваються у цих підсистемах у цілому, так і процесів, що відбуваються в окремих їхніх конструктивних елементах. Наукова новизна роботи полягає в тому, що розроблена в ній математична модель одиничного об'єкту зможе стати основою для побудови узагальненої математичної моделі комплексу довільної конфігурації за модульним принципом, що надалі дасть змогу автоматизувати процес формування рівнянь. Модель дає змогу проводити комп'ютерні дослідження режимів роботи потужних комплексів транспортування рідини без проведення натурних експериментів. Використання моделі може стати чи не єдиним доступним засобом під час проектування нових об'єктів, розроблення автоматичних систем керування, а також для прогнозування режимів роботи діючих об'єктів. У подальшому планується розроблення математичної моделі динамічних режимів багатоагрегатного електротехнічного комплексу «електропостачальна система – помпова станція» з комбінованим (послідовним / паралельним) сполученням ВН гідравлічної підсистеми. Розроблення побудованої за модульним принципом узагальненої математичної моделі, а не моделі конкретного об'єкта, значно розширить сферу практичного застосування, оскільки це дасть змогу легко адаптувати її до конкретних конфігурацій сполучень та складу обладнання.

Перелік використаних джерел:

1. Energy efficiency analysis of fixed-speed pump drives with various types of motors / V. Goman, S. Oshurbekov, V. Kazakbaev, V. Prakht [et al.] // Applied Sciences. – 2019. – Vol. 24, iss. 9. – Pp. 1-12. – Mode of access: <https://doi.org/10.3390/app9245295>.
2. Куцик А.С. Математична модель системи «частотно-керований електропривод – насос – водопровідна мережа» / А.С. Куцик, А.О. Лозинський, О.Ф. Кінчур // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – 2015. – № 834. – С. 48-55. – (Серія: Електроенергетичні та електромеханічні системи).
3. Лезнов Б.С. Применение регулируемого электропривода в насосных установках систем водоснабжения и водоотведения / Б.С. Лезнов // Экологические системы: электронный журнал энергосервисной компании. – Кременчуг, 2010. – № 11. – С. 9-12.
4. Багатоцільова оптимізація усталених режимів роботи електроприводної нафтоперекачувальної станції / І.І. Яремак, В.С. Костишин // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. – 2018. – Вип. 1. – С. 15-21. – Режим доступу: <https://doi.org/10.30929/1995-0519.2018.1.15-21>.
5. Мелихов А.Ю. Разработка энергосберегающего алгоритма управления плавным пуском асинхронных двигателей насосной станции. Часть 2. Математическая модель энергетической подсистемы насосной станции / А.Ю. Мелихов, Ю.В. Колоколов // Системы управления и информационные технологии. – 2009. – № 1.3 (35). – С. 369-374.
6. Костишин В.С. Аналіз показників ефективності та надійності роботи насосного агрегата на засадах системного підходу / В.С. Костишин, І.І. Яремак // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2017. – № 1. – С. 50-60.
7. Мелихов А.Ю. Разработка энергосберегающего алгоритма управления плавным пуском асинхронных двигателей насосной станции. Часть 3. Математическая модель гидравлической подсистемы насосной станции / А.Ю. Мелихов // Системы управления и информаци-

- онные технологии. – 2009. – № 3.2 (37). – С. 263-267.
8. Андрущак С.В. Математическое и имитационное моделирование процесса транспортирования и дозирования шлама / С.В. Андрущак, П.В. Беседин // Научные ведомости Белгородского государственного университета. – 2016. – № 16. – С. 115-122. – (Серия: Экономика. Информатика).
 9. Harihara P. Fault Diagnosis of Centrifugal Pumps Using Motor Electrical Signals / P. Harihara, A. Parlos // Centrifugal Pumps. – 2012. – Pp. 15-32. – Mode of access: <https://doi.org/10.5772/26439>.
 10. Fault diagnosis of centrifugal pumps based on the intrinsic time-scale decomposition of motor current signals / S. Alabied, O. Hamomd, A. Daraz, F. Gu, A. D. Ball // 2017 23rd International Conference on Automation and Computing (ICAC). – Huddersfield, 2017. – Pp. 1-6. – Mode of access: <https://doi.org/10.23919/ICoAC.2017.8082027>.
 11. Misiunas D. Burst Detection and Location in Pipelines and Pipe Networks with application in water distribution systems / D. Misiunas. – 113 p. – Mode of access: <http://www.iea.lth.se/publications/Theses/LTH-IEA-1038.pdf>.
 12. Яремак І.І. Багатоцільова оптимізація усталених режимів роботи електроприводних насосних станцій магістральних нафтопроводів : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.13.07 / Яремак Ірина Ігорівна; Івано-Франків. нац. техн. ун-т нафти і газу. – Івано-Франківськ, 2018. – 20 с.
 13. Paranchuk Y.S. Energy efficient power supply system and automatic control of the complex «power supply – pumping station» modes / Y.S. Paranchuk, V.H. Lysiak // Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. – 2018. – № 3. – Pp. 115-124. – Режим доступу: <https://doi.org/10.29202/nvngu/2018-3/16>.
 14. Лысяк В.Г. Математическая модель электротехнического комплекса системы энергоснабжения / В.Г. Лысяк, Ю.Л. Шелех, М.Б. Сабат // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2017. – Т. 17, № 4. – С. 733-743. – Режим доступу: <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2017-17-4-733-743>.
 15. Костишин В.С. Дослідження динамічних режимів роботи електроприводних відцентрових насосних агрегатів за допомогою їхніх комп'ютерно-орієнтованих Bond Graph моделей / В.С. Костишин, П.О. Курляк // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2012. – № 2. – С. 148-153.
 16. Яремак І.І. Керування режимами електрогидравлічного комплексу на підставі системного підходу / І.І. Яремак, В.С. Костишин // Науковий вісник НЛТУ України. – 2020. – № 30(3). – С. 83-88. – Режим доступу: <https://doi.org/10.36930/40300314>.
 17. Mathematical Modeling and Simulation of Transients in Power Distribution Systems with Valve Devices and Dynamic Loading / P. Gogolyuk, T. Grechyn, A. Ravlyk, I. Grinberg // Proceedings of the IEEE Power Engineering Society General Meeting. – 2003. – Pp. 1580-1585.
 18. Lysiak V. Modeling of Hydraulic Load of Electric Drive in Electrical Complex of Pumping Station / V. Lysiak, M. Oliinyk, Yu. Shelekh // Energy Engineering and Control Systems. – 2018. – Vol. 4, no. 1. – Pp. 31-36. – Mode of access: <https://doi.org/10.23939/jeecs2018.01.031>.
 19. Костишин В. С. Моделирование режимів роботи відцентрових насосів на основі електрогидравлічної аналогії : автореф. дис. д-ра техн. наук : 05.15.13 / Костишин Володимир Степанович; Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу. – Івано-Франківськ, 2003. – 36 с.
 20. Kostyshyn V.S. Creation of object-oriented model of centrifugal pump on the basis of electrohydrodynamic analogy method / V.S. Kostyshyn, I.I. Yaremak, P.O. Kurlyak // Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. – 2019. – № 6. – Pp. 72-79. – Mode of access: <https://doi.org/10.29202/nvngu/2019-6/11>.
 21. Kostyshyn V.S. Simulation of performance characteristics of centrifugal pumps by the electrohydrodynamic analogy method / V.S. Kostyshyn, P.O. Kurlyak // Journal of Hydrocarbon Power Engineering. – 2015. – Vol. 2, № 1. – Pp. 24-31.
 22. Шелепетень Т. М. Обчислення інтегральних параметрів електромагнітних апаратів з допомогою цифрових моделей / Т.М. Шелепетень // Технічна електродинаміка : спец. вип. за матер. II Міжнародної наук.-техн. конф. «Математичне моделювання в електротехніці і елект-

родинаміці». – К., 1998. – С. 169-172.

23. Пустоветов М. Компьютерное моделирование асинхронных двигателей и трансформаторов. Примеры взаимодействия с силовыми электронными преобразователями / М. Пустоветов, К. Солтус, И. Синявский. – Saarbrücken : LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. – 199 с.

References:

1. Goman V., Oshurbekov S., Kazakbaev V., Prakht V., Dmitrievskii V. Energy efficiency analysis of fixed-speed pump drives with various types of motors. *Applied Sciences*, 2019, vol. 24, iss. 9, pp. 1-12. doi: 10.3390/app9245295.
2. Kutsyk A.S., Lozynskiy A.O., Kinchur O.F. Matematichna model' sistemi «chastotno-kerovaniya elektroprivoda – nasos – vodop-rovodna mrezhka» [Mathematical model of the system «frequency-controlled electric drive - pump - water supply network»]. *Visnik Natsional'nogo universitetu «L'viv's'ka politekhnika». Seriya: Elektroenergetichni ta elektromekhanichni sistemi – Bulletin of the Lviv Polytechnic National University. Series of Electrical Power and Electromechanical Systems*, 2015, no. 834, pp. 48-55. (Ukr.)
3. Leznov B.S. Primenenie reguliruemogo elektroprivoda v nasosnykh ustanovkakh sistem vodosnab-zheniya i vodootvedeniya [The use of an adjustable electric drive in pumping installations of water supply and sewerage systems]. *Ekologicheskie sistemy: elektronnyi zhurnal energoservisnoi kompanii – Ecological systems: an electronic journal of an energy service company*, 2010, no. 11, pp. 9-12. (Rus.)
4. Yaremak I.I., Kostyshyn V.S. Bagatotsil'ova optimizatsiya ustalenykh rezhimiv roboti elektroprivodnoi naftoperekachuval'noi stantsii [Multi-objective optimization of steady operating modes of electric oil pumping station]. *Visnyk Kremenchutskoho natsionalnoho universitetu imeni Mykhaila Ostrohradskoho – Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University*, 2018, vol. 1, pp. 15-21. doi: 10.30929/1995-0519.2018.1.15-21. (Ukr.)
5. Melikhov A.Yu., Kolokolov Yu.V. Razrabotka energosberegaiushchego algoritma upravleniya plavnym puskom asinkhronnykh dvigatelei nasosnoi stantsii. Chast' 2. Matematicheskaya model' energeticheskoi podsistemy nasosnoi stantsii [Development of an energy-saving algorithm for controlling the smooth start of asynchronous motors of a pumping station. Part 2. Mathematical model of the power subsystem of the pumping station]. *Sistemy upravleniya i informatsionnye tekhnologii – Control systems and information technology*, 2009, no. 1.3 (35), pp. 369-374. (Rus.)
6. Kostyshyn V.S., Yaremak I.I. Analiz pokaznikov effektivnosti ta nadiinosti roboti nasosnogo agregata na zasadakh sistemnogo pidkhodu [Analysis of efficiency and reliability of the pump unit on the basis of a systematic approach]. *Rozvidka ta rozrobka naftovikh i gazovikh rodovishch – Prospecting and Development of Oil and Gas Fields*, 2017, no. 1, pp. 50-60. (Ukr.)
7. Melikhov A.Yu. Razrabotka energosberegaiushchego algoritma upravleniya plavnym puskom asinkhronnykh dvigatelei nasosnoi stantsii. Chast' 3. Matematicheskaya model' gidravlicheskoj pod-sistemy nasosnoi stantsii [Development of an energy-saving algorithm for controlling the smooth start of asynchronous motors of a pumping station. Part 3. Mathematical model of the hydraulic subsystem of the pumping station]. *Sistemy upravleniya i informatsionnye tekhnologii – Control systems and information technology*, 2009, no. 3.2 (37), pp. 263-267. (Rus.)
8. Andrushhak S.V., Besedin P.V. Matematicheskoe i imitatsionnoe modelirovanie protsessa transportirovaniya i do-zirovaniya shlama [Mathematical and simulation modeling of the process of transportation and dosing of sludge]. *Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Ekonomika. Informatika – Belgorod State University. Scientific Bulletin. Series: Economics. Information technologies*, 2016, no. 16, pp. 115-122. (Rus.)
9. Harihara P., Parlos A. (2012). Fault Diagnosis of Centrifugal Pumps Using Motor Electrical Signals. *Centrifugal Pumps*, 2012, pp. 15-32. doi: 10.5772/26439.
10. Alabied S., Hamomd O., Daraz A., Gu F., Ball A.D. Fault diagnosis of centrifugal pumps based on the intrinsic time-scale decomposition of motor current signals. *23rd International Conference on Automation and Computing (ICAC)*, 2017, pp. 1-6. doi: 10.23919/ICAC.2017.8082027.
11. Misiunas D. Burst Detection and Location in Pipelines and Pipe Networks with application in water distribution systems. Lund, 2004. 113 p. Available at : <http://www.iea.lth.se/publications/Theses/LTH-IEA-1038.pdf>.

12. Yaremak I.I. *Bagatotsil'ova optimizatsiia ustalenykh rezhimiv roboti elektroprivodnykh nasosnykh stantsii magistral'nykh naftoprovodiv*. Avtoref. diss. kand. techn. nauk [Multi-purpose optimization of steady-state modes of operation of electric pumping stations of main oil pipelines. Thesis of Cand. tech. sci. diss.]. Ivano-Frankivsk, 2018. 20 p. (Ukr.)
13. Paranchuk Y.S., Lysiak V.H. Energy efficient power supply system and automatic control of the complex «power supply – pumping station» modes. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2018, no. 3, pp. 115-124. doi: [10.29202/nvngu/2018-3/16](https://doi.org/10.29202/nvngu/2018-3/16).
14. Ly`syak V.G., Shelekh Yu.L., Sabat M.B. Matematicheskaia model' elektrotekhnicheskogo kompleksa sistemy energosnabzheniia [Mathematical model of electrotechnical complex for power supply system]. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki – Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2017, vol. 17, no. 4, pp. 733-743. doi: [10.17586/2226-1494-2017-17-4-733-743](https://doi.org/10.17586/2226-1494-2017-17-4-733-743). (Rus.)
15. Kostyshyn V.S., Kurliak P.O. Doslidzhennia dinamichnykh rezhimiv roboti elektroprivodnykh vidtsentrovnykh nasosnykh agregativ za dopomogoiu ikhnykh komp'uterno-orientovanykh Bond Graph modelei [Investigation of dynamic modes of operation of electric centrifugal pump units using their computer-oriented Bond Graph models]. *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu – Visnyk of Vinnytsia Polytechnical Institute*, 2012, no. 2, pp. 148-153. (Ukr.)
16. Yaremak I.I., Kostyshyn V.S. Keruvannia rezhymamy elektrohivavlichnoho kompleksu na pidstavi systemnoho pidkhodu [Control of modes of electrohydraulic complex on the basis of a system approach]. *Naukovyi visnyk NLTU Ukrainy – Scientific Bulletin of Ukrainian National Forestry University*, 2020, no. 30 (3), pp. 83-88. doi: [10.36930/40300314](https://doi.org/10.36930/40300314). (Ukr.)
17. Gogolyuk P., Grechyn T., Ravlyk A., Grinberg I. Mathematical Modeling and Simulation of Transients in Power Distribution Systems with Valve Devices and Dynamic Loading. *Proceedings of the IEEE Power Engineering Society General Meeting*, Toronto, 2003, pp. 1580-1585.
18. Lysiak V., Oliinyk M., Shelekh Yu. Modeling of Hydraulic Load of Electric Drive in Electrical Complex of Pumping Station. *Energy Engineering and Control Systems*, 2018, vol. 4, no. 1, pp. 31-36. doi: [10.23939/jeecs2018.01.031](https://doi.org/10.23939/jeecs2018.01.031).
19. Kostyshyn V.S. *Modeliuvannia rezhymiv roboty vidtsentrovnykh nasosiv na osnovi elektrohivavlichnoi analohii*. Avtoref. diss. dokt. techn. nauk [Modeling of operation modes of centrifugal pumps based on electrohydraulic analogy. Thesis of Doct. tech. sci. diss.]. Ivano-Frankivsk, 2003. 36 p. (Ukr.)
20. Kostyshyn V.S., Yaremak I.I., Kurlyak P.O. Creation of object-oriented model of centrifugal pump on the basis of electro-hydrodynamic analogy method. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2019, no. 6, pp. 72-79. doi: [10.29202/nvngu/2019-6/11](https://doi.org/10.29202/nvngu/2019-6/11).
21. Kostyshyn V.S., Kurlyak P.O. Simulation of performance characteristics of centrifugal pumps by the electro-hydrodynamic analogy method. *Journal of Hydrocarbon Power Engineering*, 2015, vol. 2, no. 1, pp. 24-31.
22. Shelepeten T.M. Obchyslennia intehralnykh parametriv elektromahnitnykh aparativ z dopomohoiu tsyfrovnykh modelei [Calculation of integrated parameters of electromagnetic devices using digital models]. *Tekhnichna elektrodynamika : spets. vyp. za mater. II Mizhnarodnoi nauk.-tekhn. konf. «Matematychni modeliuvannia v elektrotekhnitsi i elektrodynamitsi» – Technical electrodynamics: special. issue according to the materials of the II International scientific and technical. conf. «Mathematical modeling in electrical engineering and electrodynamics»*, Kiev, 1998, pp. 169-172. (Ukr.)
23. Pustovetov M., Soltus K., Sinyavskij I. *Komp'yuternoe modelirovanie asinkhronny`kh dvigatelej i transformatorov. Primery` vzaimodejstviya s silovy`mi e`lektronny`mi preobrazovatelyami* [Computer simulation of induction motors and transformers. Examples of interaction with power electronic converters]. Saarbrücken, LAP LAMBERT Academic Publ., 2013. 199 p. (Rus.)

Рецензент: М.Б. Сабат
канд. техн. наук, доц., НУ «Львівська політехніка»

Стаття надійшла 01.03.2021

**ВИКОРИСТАННЯ СКЛАДОВИХ МИТТЄВОЇ ПОТУЖНОСТІ
ПРИ ЛОКАЛЬНОМУ ТЕСТУВАННІ ШИХТОВАНИХ ОСЕРДЬ СТАТОРІВ
СИНХРОННИХ ДВИГУНІВ ІНДУКЦІЙНИМ МЕТОДОМ**

У роботі вдосконалено метод використання складових миттєвої потужності у якості діагностичних параметрів при локальному індукційному тестуванні осердь статорів синхронних двигунів. Обумовлено шляхи покращення їх інформативності, стійкості та вірогідності при зміні ступеня насичення магнітної системи, частоти та відстані між індуктором та зубцями осердь, що обумовлюють реальні режими їх діагностики.

Ключові слова: синхронний двигун, шихтоване осердя, локальне тестування, індукційний метод, види намагнічування, миттєва потужність, спектральні складові, діагностичні параметри.

V.V. Prus, O.O. Dehtiarenko, R.A. Vakulenko, V.S. Dziuban. The use of instantaneous power components in local testing of laminated cores of synchronous motor stators by induction method. The problem of long-term operation of synchronous motors consists in the deterioration of the properties of the main indispensable structural units, among which stator laminated cores should be noted first of all. Their main damage, such as short circuiting of individual sheets of electrical steel of the core and weakening of compression, cause a redistribution of its electrical and magnetic properties. As a result, it causes anomalies in the growth of steel losses in local areas of the core, which entails local overheating of the stator winding, and, in the case of high-power synchronous motors, can lead to mechanical and thermomechanical destruction of the core as a whole. Various methods are used to determine the location of such anomalies, among which local induction is the most promising one. Their use is limited by the low probability of such diagnostics, primarily due to the lack of a sufficient number of independent diagnostic parameters to distinguish the main types of damage to the laminated cores depending on their location. The results of previous research determine the prospects for the use of instantaneous power components as diagnostic parameters. However, there is no research on the application of such parameters in real modes of local diagnosis when the conditions of its implementation change. With solving this problem, the paper contains the description of the improved method of the use of power components as diagnostic parameters at local induction testing of the cores of synchronous motor stators. The ways to improve their informativeness, stability and reliability with the change of the degree of saturation of the magnetic system, frequency and distance between the inductor and the teeth of the cores, which determine the real modes of their diagnosis, are specified.

Keywords: synchronous motor, laminated core, local testing, induction method, types of magnetization, instantaneous power, spectral components, diagnostic parameters.

Постановка проблеми. Досвід експлуатації та статистика відмов синхронних двигунів (СД) із тривалим напрацюванням свідчать про погіршення їх експлуатаційних параметрів, ене-

¹ канд. техн. наук, доцент, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, м. Кременчук, ORCID: 0000-0002-2203-6878, viacheslav.prus@gmail.com

² провідний інженер конверторного цеху з реконструкції обладнання, ПрАТ «МК «Азовсталь», м. Маріуполь, degtvarenko1977@gmail.com

³ канд. техн. наук, доцент, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, м. Кременчук, rom.vak311@gmail.com

⁴ д-р техн. наук, професор, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, м. Кременчук, ke@kdu.edu.ua

ретичної ефективності та надійності. Причиною цього у переважній більшості випадків є зміна властивостей основних конструктивних вузлів, серед яких слід окремо виділити шихтовану електротехнічну сталь (ЕТС), яка є основним конструкційним матеріалом, незамінюваним у ході ремонтів. Зазначене обумовлює актуальність завдання визначення дійсних властивостей шихтованих осердь з ЕТС у ході тривалої експлуатації та ремонтів СД з метою оцінювання ефективності, можливостей їх подальшого використання за призначенням та проведення необхідних ремонтних операцій з відновлення [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Результати попередніх досліджень доводять ефективність застосування для визначення стану шихтованих осердь локальних методів тестування [2]. Однією з основних функцій, що визначають ефективність використання таких методів та систем контролю і діагностики на їх основі, є забезпечення достатнього рівня вірогідності, що, у свою чергу, обґрунтовує вимоги до кількісного та якісного складу незалежних діагностичних параметрів, на яких базується визначення критеріїв діагностики [3]. У роботі [4] доведено можливість застосування у якості діагностичних параметрів складових миттєвої потужності. Однак недостатньо дослідженими залишаються питання забезпечення їх належної інформативності та вірогідності у різних умовах тестування.

У цьому плані особливістю СД є порівняно більша одинична потужність, що обумовлює як зростання габаритних розмірів усієї конструкції електричної машини та її основних конструктивних частин, так і дещо інше їх технічне виконання внаслідок більших механічних та електричних навантажень. У застосуванні до статорів СД це, починаючи з певної потужності, означає їх виготовлення з окремих пакетів та прямокутну відкриту або напіввідкриту форму пазів при достатньо великій їх глибині [5], що потребує окремого дослідження ефективності застосування безконтактного тестування. Також недостатньо вивченим є питання впливу ступеня насичення магнітного матеріалу у ході тестування та частоти напруги живлення індуктора на стійкість та вірогідність застосування складових миттєвої потужності у якості незалежних діагностичних параметрів.

Мета роботи – дослідження питань особливостей застосування складових миттєвої потужності у якості діагностичних параметрів при локальному діагностуванні шихтованих осердь СД.

Виклад основного матеріалу. Базовий контактний метод локального тестування шихтованих осердь статорів пояснюється рис. 1 [2]. Відповідно до нього, визначаються магнітні та електричні властивості шихтованого осердя на досліджуваній індуктором 3 ділянці статора з одночасним оцінюванням наявності пошкоджень верхньої частини одного із зубців індуктором 2.

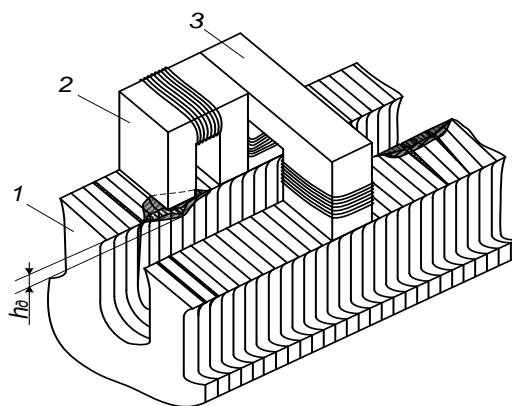


Рис. 1 – Базовий контактний метод діагностики: 1 – осердя статора; 2 – індуктор для тестування за одним зубцем; 3 – індуктор для тестування за двома зубцями; h_0 – висота повітряного проміжку між індуктором та поверхнею зубцевої зони у місцях дефектів

На вірогідність діагностики, яку обумовлює стійкість зміни діагностичних параметрів та сформованих критеріїв, впливають ступінь насичення утворюваної магнітної системи, що визначає межу кількість незалежних параметрів, та частота напруги живлення, зміна якої обу-

мовлює іншу їх чутливість через зв'язок з індуктивними опорами еквівалентного електричного кола. Повітряні проміжки, що неминуче виникають при цьому між індуктором та зубцем внаслідок припустимої нерівномірності поверхні зубцевої зони, обумовлюють змінну величину магнітного опору отриманого кола, що також позначається на вірогідності результатів діагностики.

При цьому можливим шляхом компенсації останньої проблеми є застосування безконтактного способу діагностики (рис. 2) за певної, обмеженої на рівні 0,2-0,7 мм, величини додаткового h_n повітряного проміжку [6].

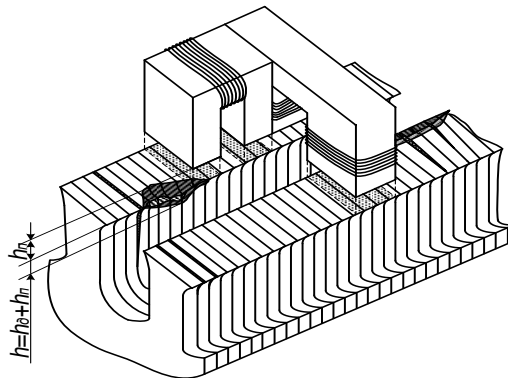


Рис. 2 – Безконтактний метод діагностики: h_n – величина повітряного проміжку між індуктором та зубцем, яка виставляється на початку діагностики; h – загальна величина повітряного проміжку між індуктором і зубцем з урахуванням h_n і h_0

Наявність стійких діагностичних параметрів та критеріїв діагностики дозволяє додатково до вимірювання втрат P_μ у сталі і величини магнітної індукції B_m на досліджуваній ділянці зубців у робочому режимі, визначати точне місце розташування і характер пошкоджень шихтованих осердь (ослаблення пресування та закорочування).

Розглянемо основні причини виникнення додаткових похибок при визначенні складових миттєвої потужності $p_\mu(t)$ втрат у сталі, відповідно до [7], та можливі шляхи їх компенсації.

1. Так як зазначені складові потужності обчислюються у непрямий спосіб з миттєвих значень струму $i_1(t)$ у намагнічувальній обмотці та напруги $u_2(t)$ на вимірювальній обмотці індуктора, впливовими збурюючими факторами є будь-які зміни стану складеної системи «індуктор-ділянка осердя», що обумовлюють величину та форму вихідних сигналів, викликані пошкодженнями. При цьому під основними оцінюваними параметрами, відповідно до [7], розуміються певні комбінації квадратурних синусних та косинусних складових окремих гармонік $i_1(t)$ та $u_2(t)$, що формують відповідні знакозмінні складові миттєвої потужності згідно із співвідношенням

$$p_\mu(t) = P_\mu + \sum_v P_{vc} \cos(v\omega t) + \sum_v Q_{vs} \sin(v\omega t), \quad (1)$$

де ν – номер гармоніки; ω – кутова частота першої гармоніки; $p_\mu(t), P_\mu, Q_{vs}, P_{vc}$ – відповідно миттєва потужність втрат у сталі, постійна та знакозмінні синусна й косинусна її складові. Основою їх визначення, згідно [7], є відповідні квадратурні складові напруги та струму $a_{i1\nu}, b_{i1\nu}, a_{u2\nu}, b_{u2\nu}$, що обумовлює безпосереднє використання співвідношень, які не враховують величину кута зсуву між $i_1(t)$ та $u_2(t)$, використання якого при реальних кутах навантаження, наближених до 90° , що відповідають умовам локального тестування, є причиною внесення суттєвих похибок.

Достатньо ефективним шляхом компенсації такої похибки є використання швидкого перетворення Фур'є (ШПФ). До того ж, даний алгоритм забезпечує мінімальний обсяг обчислювань та реалізований у вигляді готової функції у більшості математичних програмованих середовищ.

Найчастіше застосовувана для цього функція $\text{fft}(x)$ системи Mathcad виконує ШПФ для даних, представлених дійсними числами – значеннями вихідного вектора x . Однак при цьому вектор x повинен мати 2^m складових, де m – ціле число, так як другий випадок відповідає невірному розміру вектору [8].

Елементи вектору, який повертається функцією $\text{fft}(x)$, описуються співвідношенням

$$C_v = \frac{1}{\sqrt{n}} \sum_{k=0}^{n-1} x_k e^{2\pi i(v/n)k}.$$

Тут n – число елементів вектору x , i – уявна одиниця, k – індекс додавання (від 0 до $n - 1$) і v – номер гармоніки (від 0 до $n/2$).

Зазначені елементи вектору відповідають частотам

$$f_i = \frac{v}{n} f_s,$$

де f_s – частота квантування сигналу, що підлягає ШПФ.

2. Так як дефекти осердь, відповідно до [2], викликають неоднозначні зміни параметрів кола «індуктор-ділянка осердя», що впливають на складові його повного електричного опору, оцінювати знакозмінні складові миттєвої потужності необхідно залежно від діючого значення I_1 струму $i_1(t)$, забезпечуючи його сталість у процесі тестування і тим самим задаючи фіксований основний магнітний потік Φ_0 через стабілізацію магніторушійної сили (МРС) $I_1 W_n$ за умови фактичної сталості магнітного опору кола «індуктор-ділянка осердя» Z_M за наявності додаткового повітряного проміжку.

Так, відповідно до [9], потік Φ_0 у магнітній системі «індуктор-ділянка осердя» відстає по фазі на деякий кут α від струму i_1 у намагнічуючій обмотці W_n котушки і, отже, від МРС $i_1 W_n$, що можна врахувати, вводячи до закону Ома для магнітного кола

$$\dot{\Phi}_{0m} = \frac{\dot{I}_{1m} W_n}{Z_M}$$

комплексний магнітний опір осердя

$$Z_M = |Z_M| e^{j\alpha} = R_M + jX_M.$$

Зазначений параметр напряму пов'язаний з конструктивними параметрами індуктора та властивостями магнітного матеріалу через співвідношення

$$Z_M = \frac{\dot{I}_{1m} W_n}{\dot{\Phi}_{0m}} = \frac{\dot{H}_m l_{cep}}{\dot{B}_m S_i} = \frac{l_{cep}}{\dot{\mu} S_i},$$

де $\dot{\mu} = \frac{\dot{B}_m}{\dot{H}_m}$ – комплексна магнітна проникність, l_{cep} – довжина середньої лінії магнітного потоку, S_i – перетин зубця індуктора.

З другого боку, комплексний магнітний опір Z_M осердя пов'язаний з комплексним електричним опором Z_μ контуру намагнічування, що визначається напругою \dot{U}_{0m} на його виводах, через співвідношення

$$\frac{1}{Z_\mu} = \frac{Z_M}{j\omega W_n^2} = \frac{R_M + jX_M}{j\omega W_n^2},$$

звідки

$$Z_\mu = R_\mu + jX_\mu = \frac{j\omega W_n^2}{R_M + jX_M} = \frac{\omega X_M W_n^2}{R_M^2 + X_M^2} + \frac{j\omega R_M W_n^2}{R_M^2 + X_M^2}.$$

3. Так як зміна частоти напруги живлення переважно впливає на пропорційну їй зміну величини індуктивності X_{s1} розсіювання обмотки заступної схеми кола «індуктор-ділянка осердя» при порівняно меншій зміні індуктивності X_μ контуру намагнічування через особливості зміни магнітної проникності [10], варіювання частоти дозволяє перерозподіляти чутливість до виявлення пошкоджень між параметрами, що відносяться до обмотки та контуру намагнічування.

4. Особливості зміни складових миттєвої потужності втрат у сталі як діагностичних параметрів додатково обумовлені рівнем електромагнітних навантажень, що визначається ступенем насичення шихтованих осердь. Зазначене пов'язане з нелінійним характером зміни цих параметрів в умовах нелінійності кривої намагнічування. При цьому лише на незначній початковій ділянці основної кривої намагнічування ЕТС і магнітна індукція B , обумовлена характером $u_2(t)$, і напруженість H магнітного поля, що визначається через $i_1(t)$, є синусоїдальними. Як правило, ця ділянка кривої намагнічування не є робочою для умов локального тестування старторів. Далі одна з величин стає несинусоїдальною, що продовжується до точки насичення, після чого несинусоїдальними є обидві величини.

З метою обґрунтування умов розділення різних видів перемагнічування ЕТС був випробуваний ряд магнітних кіл індукторів з нанесеними намагнічуючою W_n та вимірювальною W_g обмотками із різними співвідношеннями опорів намагнічуючого кола та намагнічуючого контуру, для яких на підставі індукційного методу вимірювання магнітної індукції знімалися за допомогою вимірювально-діагностичного комплексу миттєві значення напруги на обмотці, що намагнічує, $u_1(t)$, струму в обмотці, що намагнічує, $i_1(t)$ і напруги на вимірювальній обмотці $u_2(t)$ для різних точок основної кривої намагнічування. У якості матеріалу для магнітних кіл використовувалась ЕТС типу 2013 з товщиною листа 0,5 мм.

У результаті аналізу результатів досліджень було з'ясовано, що умова їх поділу – певні співвідношення між активними опорами намагнічуючої обмотки R_1 і намагнічуючого контуру R_μ :

– у випадку, коли $R_\mu \ll R_1$, маємо на нелінійній ненасиченій ділянці основної кривої намагнічування несинусоїдальну зміну магнітної індукції B і синусоїдальну напруженість H магнітного поля H ;

– у випадку, коли R_μ і R_1 – величини одного порядку, на нелінійній ненасиченій ділянці основної кривої намагнічування маємо випадок із синусоїдальною магнітною індукцією B і несинусоїдальною напруженістю магнітного поля H .

Тобто, види намагнічування залежать від співвідношення споживання активної потужності намагнічуючим колом та намагнічуючим контуром. Зміну форм кривих $B(t) \equiv e_2(t) \equiv u_2(t)$ і $H(t) \equiv i_1(t)$ при різних видах намагнічування представлено на рис. 3 і 4.

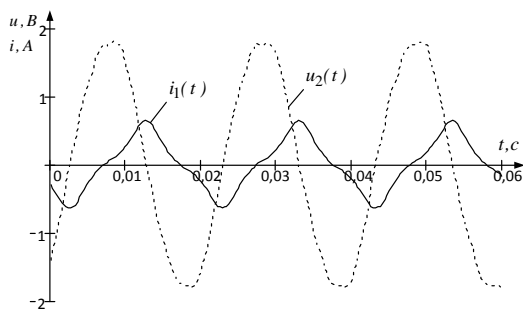


Рис. 3 – Особливості перемагнічування індуктора за умови $R_\mu \ll R_1$

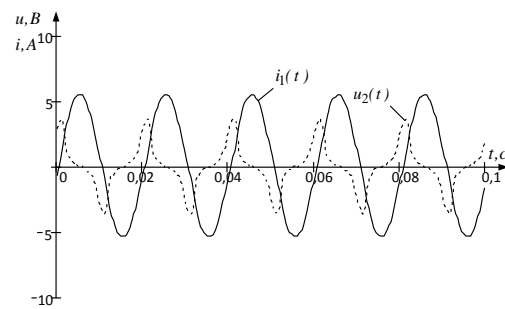


Рис. 4 – Особливості перемагнічування індуктора за умови $R_\mu \approx R_1$

Це обумовлює ефективність впливу повітряного проміжку на зміну форми сигналу миттєвої потужності шляхом зменшення нелінійних викривлень однієї з кривих $i_1(t)$ або $u_2(t)$, тим самим забезпечуючи більшу стійкість оцінюваних складових в умовах різних видів пошкоджень. Зазначений ефект підсилюється на ослаблених ділянках внаслідок впливу додаткових еквівалентних повітряних проміжків і найбільше проявляється у найпоширеніших умовах $R_\mu \ll R_1$.

При поточкових розрахунках на першій гармоніці еквівалентного електричного кола, що відповідає умовам тестування, спостерігається зростання значень активного R і реактивного X опорів для повного кола та відповідних їм опорів для контуру намагнічування на ненасиченій

ділянці, яке змінюється їх зниженням у зоні насичення, що особливо суттєво при високих ступенях насичення (рис. 5-6) і обумовлює ефективність проведення діагностування саме за таких умов.

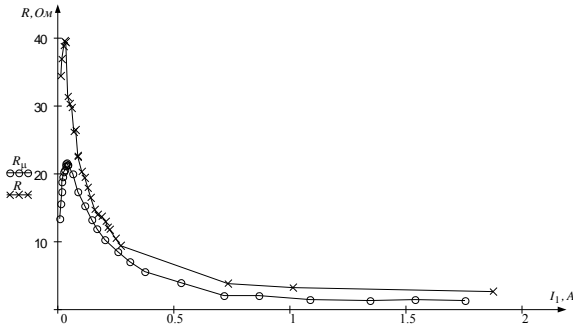


Рис. 5 – Зміна активних опорів еквівалентного електричного кола при зміні ступеня насичення

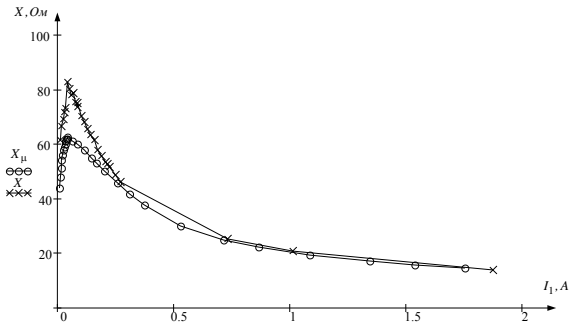


Рис. 6 – Зміна реактивних опорів еквівалентного електричного кола при зміні ступеня насичення

Спільне застосування зазначених принципів та обмежень обумовлює підвищення ефективності використання знакозмінних складових миттєвої потужності у якості незалежних діагностичних параметрів при стабілізації середньоквадратичного значення споживаного струму в умовах високого ступеня насичення системи «індуктор-ділянка осердя» та наявності додаткового повітряного проміжку між індуктором та тестованою поверхнею на рівні 0,5 мм згідно [7], що доводять результати, представлені на рис. 7. При цьому найвищою є інформативність складових, що формують знакозмінні ортогоналі миттєвої потужності згідно з (1), отримувані суто з одночастотних складових вищих гармонік напруги $u_2(t)$ та струму $i_1(t)$ (рис. 7, в, г) згідно з [6], а інформативність цих складових зростає із збільшенням частоти напруги живлення.

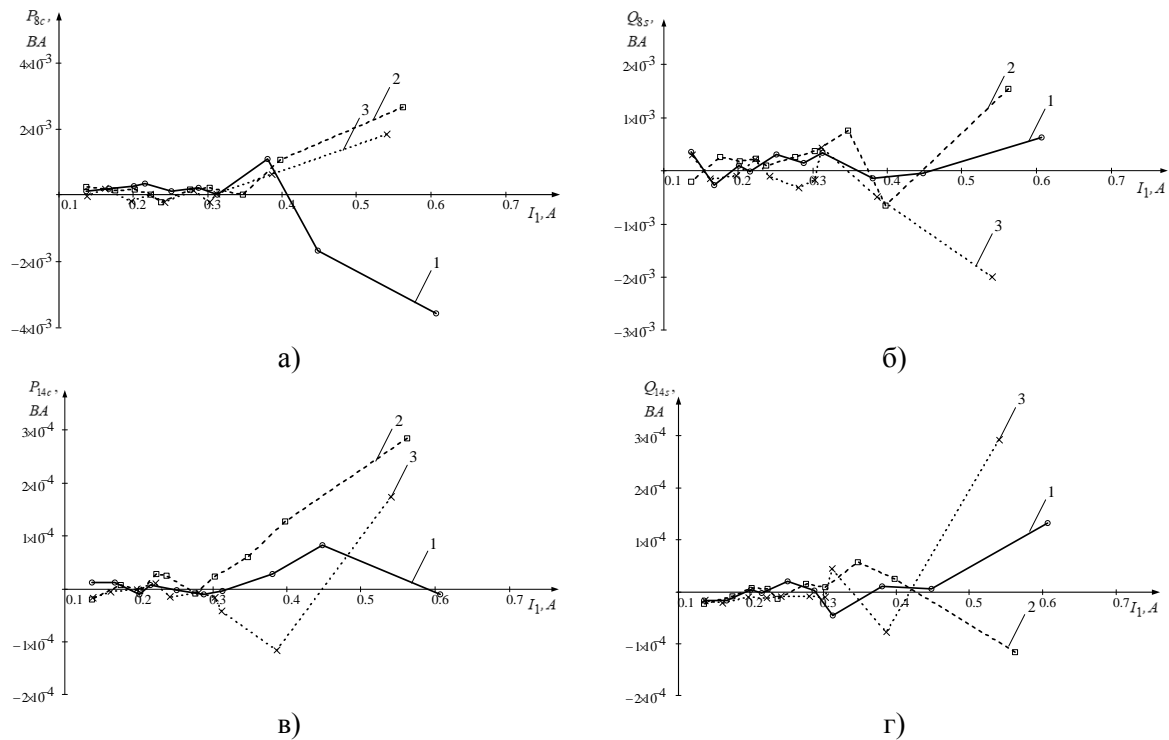


Рис. 7 – Результати визначення чутливості знакозмінних складових миттєвої потужності при безконтактному тестуванні: а, б – на частоті 50 Гц; в, г – на частоті 150 Гц для нормальної (1), закороченої (2) та розпушеної (3) ділянок осердя статора

Висновки

1. Визначено причини низької інформативності застосування складових миттєвої потужності у якості незалежних діагностичних параметрів при діагностуванні шихтованих осердь статорів синхронних двигунів.

2. Теоретично обґрунтовано та експериментально доведено ефективність застосування алгоритмів визначення складових миттєвої потужності, що виключають проміжне знаходження фазових зсувів між відповідними залежностями для струмів та напруг, які безпосередньо формують миттєву потужність втрат у сталі.

3. Обумовлено вплив ступеня насичення магнітного кола, частоти напруги живлення, виду перемагнічування та наявності додаткового повітряного проміжку на інформативність визначення основних видів дефектів шихтованих осердь статорів синхронних двигунів за складовими миттєвої потужності.

4. Для покращення ефективності та вірогідності діагностування шихтованих осердь доведено більш високу інформативність застосування складових, що формують знакозмінні ортогоналі миттєвої потужності, отримуваних суто з одночастотних складових вищих гармонік вихідних напруги та струму.

Перелік використаних джерел:

1. Prus V. The determination of the current state and the reliability indices of synchronous motors with long time between failures / V. Prus, O. Dehtiarenko // *Przeglad Elektrotechniczny*. – 2019. – R. 95, № 5. – Pp. 67-70. – Mode of access: <https://doi.org/10.15199/48.2019.05.17>.
2. Пат. 62491А, Україна, МКИ G 01 R 31/34, G 01 R 33/14, H 02 K 15/00. Спосіб діагностики зубцевої зони пакетів електротехнічної сталі електричних машин / В.В. Прус, Д.Й. Родькін, О.А. Войтех, Р.М. Петров. – № 2003042863; заявл. 02.04.2003; опубл. 15.12.2003, Бюл. № 12. – 6 с.
3. Zagirnyak M. Ways of efficiency improvement of local diagnostic of the cores of induction motor stators / M. Zagirnyak, V. Prus, A. Miroshnykova // *Przeglad Elektrotechniczny*. – 2015. – R. 91, № 1. – Pp. 217-220. – Mode of access: <https://doi.org/10.15199/48.2015.01.50>.
4. Прус В.В. Формування достатнього набору діагностичних параметрів при локальному тестуванні пакетів сталі статорів АД / В.В. Прус, А.О. Суторміна, Д.А. Холодов // *Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету: Наукові праці КДПУ*. – Кременчук: КДПУ. – 2005. – Випуск 3/2005 (32). – С. 164-168.
5. Постников И.М. Проектирование электрических машин / И.М. Постников. – К. : ГИТЛ УССР, 1952. – 736 с.
6. Прус В.В. Способи підвищення інформативності та вірогідності діагностики шихтованих осердь статорів синхронних двигунів / В.В. Прус, О.О. Дегтяренко, В.Ю. Дятловська // *Наука та виробництво: міжвузівський тематичний збірник наукових праць*. – Маріуполь : ДВНЗ «ПДТУ», 2021. – Вип. 24. – С. 80-88
7. Прус В.В. Алгоритм визначення складових миттєвої потужності при полігармонічних напрузі і струмі, їх аналіз та інтерпретація / В.В. Прус, А.В. Нікітіна // *Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету*. – Кременчук : КДПУ, 2004. – Вип. 4/2004 (27). – С. 45-50.
8. Дьяконов В.П. Энциклопедия Mathcad 2001i и Mathcad 11 / В.П. Дьяконов. – М. : Солон-Пресс, 2004. – 832 с.
9. Нейман Л.Р. Теоретические основы электротехники: в 3 т. Учебник для вузов / Л.Р. Нейман, К.С. Демирчян. – Ленинград: Энергоиздат, 1981. – 2 т. – 416 с.
10. Zagirnyak M. Improved method for calculation of parameters of electromagnetic and power processes in electric circuits with steel in saturation mode / M. Zagirnyak, V. Prus, D. Miljavec // *Технічна електродинаміка*. – 2015. – № 4. – С. 12-18.

References:

1. Prus V., Dehtiarenko O. The determination of the current state and the reliability indices of synchronous motors with long time between failures. *Przeglad Elektrotechniczny*, 2019, R. 95, no. 5, pp. 67-70. doi: 10.15199/48.2019.05.17.

2. Prus V.V., Rodkin D.Y., Voitek O.A., Petrov R.M. *Sposib diahnostyky zubtsevoi zony paketiv elektrotekhnichnoi stali elektrychnykh mashyn* [Method for diagnosing the toothed zone of electrical steel packages of electric machines]. Patent UA, no. 62491A, 2003. (Ukr.)
3. Zagirnyak M., Prus V., Miroshnykova A. Ways of efficiency improvement of local diagnostic of the cores of induction motor stators. *Przegląd Elektrotechniczny*, 2015, R. 91, no. 1, pp. 217-220. **doi: 10.15199/48.2015.01.50.**
4. Prus V.V., Sutormina A.O., Kholodov D.A. Formuvannia dostatnoho naboru diahnostychnykh parametriv pry lokalnomu testuvanni paketiv stali statoriv AD [Formation of a sufficient set of diagnostic parameters at local testing of IM stator steel packages]. *Visnyk Kremenchutskoho derzhavnogo politekhnichnoho universytetu – Bulletin of Kremenchug State Polytechnic University*, 2005, vol. 3/2005 (32), pp. 164-168. (Ukr.)
5. Postnikov I.M. *Proektirovanie elektricheskikh mashin* [Electric machine design]. Kiev, GITL USSR Publ., 1952. 736 p. (Rus.)
6. Prus V.V., Dehtiarenko O.O., Diatlovska V.Iu. Sposoby pidvyshchennia informatyvnosti ta virohidnosti diahnostyky shykhtovanykh oserd statoriv synkronnykh dvyhuniv [Ways to increase the informativeness and reliability of diagnostics of laminated cores of synchronous motor stators]. *Nauka ta vyrobnytstvo – Science and production*, 2021, vol. 24, pp. 80-88. (Ukr.)
7. Prus V.V., Nikitina A.V. Alhorytm vyznachennia skladovykh myttievoi potuzhnosti pry poli-harmonichnykh napruzi i strumi, yikh analiz ta interpretatsiia [Algorithm for determining the components of instantaneous power at polyharmonic voltage and current, their analysis and interpretation]. *Visnyk Kremenchutskoho derzhavnogo politekhnichnoho universytetu – Bulletin of Kremenchug State Polytechnic University*, 2004, vol. 4/2004 (27), pp. 45-50. (Ukr.)
8. D'yakonov V.P. Encyklopediya Mathcad 2001i i Mathcad 11 [Encyclopedia Mathcad 2001i and Mathcad 11]. Moscow, Solon-Press Publ., 2004. 832 p. (Rus.)
9. Nejman L.R., Demirchyan K.S. *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki. Tom 2. Uchebnik dlya vuzov* [Theoretical foundations of electrical engineering. Volume 2. Textbook for universities]. Leningrad, Energoizdat Publ., 1981. 416 p. (Rus.)
10. Zagirnyak M., Prus V., Miljavec D. Improved method for calculation of parameters of electromagnetic and power processes in electric circuits with steel in saturation mode. *Tekhnichna elektrodynamika*, 2015, no. 4, pp. 12-18.

Рецензент: С.К. Поднебенна
д-р техн. наук, доц., ДВНЗ «ПДТУ»

Стаття надійшла 01.04.2021

ТЕХНОЛОГІЯ ЗАХИСТУ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

УДК 669.004.8:621.73.073:621.974.813:621.785

doi: 10.31498/2225-6733.42.2021.240676

© Іващенко В.Ю.¹, Кухар В.В.²

ПОДОВЖЕННЯ УТИЛІЗАЦІЙНОГО РЕСУРСУ ШТАМПІВ ДЛЯ ГОРИЗОНТАЛЬНО-КУВАЛЬНИХ МАШИН

Проаналізовані тенденції впровадження у різних країнах світу принципів «зеленої» або циркулярної економіки стосовно до ковальсько-штампувального виробництва та шляхи підвищення робочої стійкості інструменту та вибору доцільного процесу утилізації як комплексного утилізаційного ресурсу штампового інструменту. Для порівняння наведено опис ситуації в Україні. Показано, що малогабаритні штампи у порівнянні з крупно- та середньогабаритними мають значно меншу ресурсоефективність, бо не підлягають відновленню та відпрацьовують лише один робочий термін. До того ж стійкість штампів однієї конструкції дуже варіюється залежно від типу руйнування, який обумовлений стохастичним комплексом чинників: хімічною неоднорідністю сталі, технологічними переробками заготовки під штамп, якістю обслуговування, станом обладнання та ін. Уповільнення процесу відходоутворення можна досягти використанням якіснішого інструменту, який витримуватиме більшу кількість кувальних циклів. Встановлено причини виходу з ладу штампів із сталі 5ХНМ для горизонтально-кувальних машин, виявлено взаємозв'язок між стійкістю та особливостями руйнування робочих поверхонь. Виявлена залежність терміну виходу з ладу штампів із сталі 5ХНМ від характеру руйнування гравюри штампа, який в свою чергу обумовлений особливостями структури та рівнем твердості сталі у термічно обробленому стані. Показано, що заходи, спрямовані на подолання основних причин розтріскування, в тому рахунку використання режимів термічної обробки, які підвищують хімічну, структурну однорідність та ударну в'язкість сталі, запобігають передчасному руйнуванню робочих поверхонь і сприяють подовженню утилізаційного ресурсу штампового інструменту. Наведено результати тестування стійкості штампів, для яких був врахований напрямок осі прокатки заготовки під штамп та застосована нова термічна обробка – термоциклічна обробка з подальшим гартуванням та відпуском на твердість 44-48 HRC. Робоча стійкість таких штампів зросла на 68%.

Ключові слова: штамповий інструмент, сталь, структура, твердість, термічна обробка, робоча стійкість, ресурсозбереження, утилізаційний ресурс.

V.Yu. Ivashchenko, V.V. Kukhar. Utilization resource extension for the dies of horizontal forging machine. The tendencies of introduction of «green» or circular economy principles in relation to forging and stamping production in different countries of the world have been analyzed, and the ways to increase the durability of the tool as well as the choice of an expedient process of utilization as a complex utilization resource of the stamping tool have been analyzed. The description of the situation in Ukraine has been given for comparison. It has been shown that small-sized dies have much lower resource efficiency as compared to large and medium-sized dies, because they are not renewable

¹ канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, gazetaxronos@gmail.com

² д-р техн. наук, професор, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, ORCID: 0000-0002-4863-7233, kvv.mariupol@gmail.com

and work only one service time. Besides the durability of the dies of the same design varies greatly, depending on the fracture's type, which is due to a stochastic set of factors: chemical inhomogeneity of steel, technological processing of the workpiece to receive the die, service quality, state of the equipment and others. Slowing down the waste generation process can be achieved by using a better tool that can withstand more forging cycles. The causes of the failure of the dies for horizontal forging machines from 5CrNiMo steel have been established, the interrelation between durability and features of destruction of working surfaces has been revealed. The dependence of the failure time of the dies on the nature of the destruction of the die engraving, which in its turn results from the peculiarities of the structure and the level of steel hardness in the heat-treated state has been found out. It has been shown that the measures aimed at overcoming the main causes of cracking, including the use of heat treatment modes that increase the chemical, structural homogeneity and toughness of steel, prevent premature destruction of working surfaces and extend the life of the stamping tool. The results of testing the stability of the dies have been presented. These were the dies for which the direction of the axis of rolling the workpiece to receive the die was taken into account and a new heat treatment - thermocycling with subsequent hardening and tempering to hardness of 44-48 HRC was applied. The working stability of such dies has increased by 68%.

Keywords: stamping tool, steel, structure, hardness, heat treatment, working durability, resource saving, utilization resource.

Постановка проблеми. Розвиток прогресивних виробничих технологій тісно пов'язаний з впровадженням сучасних принципів «зеленої» або циркулярної (кругової) економіки на всіх стадіях виробництва продукції [1, 2]. Умови сталого розвитку інтегровані у вказані принципи, згідно з якими як до продукції, так і до устаткування з інструментом, висувуються серйозні вимоги енергозбереження та ресурсоефективності протягом всього життєвого циклу [1, 2]. Комплексний розгляд виробничих процесів, серед яких гаряче та холодне об'ємне штампування, повинен передбачати подовження терміну експлуатації всіх розхідних матеріалів (в тому числі штампів) та можливості вторинного використання (утилізації) відпрацьованих вузлів та інструменту. З врахуванням високої вартості та витратності штампового інструменту тривалість його роботи до виходу з експлуатації та кількість штампів, які обслуговуються, ремонтуються і утилізуються, є факторами, що впливають на споживання ресурсів. Тому додатково слід вказати на те, що процедури технічного обслуговування, ремонту і відновлення штампів повинні вимагати малих витрат сировини, енергії та робочої сили [1].

Принципи «зеленого» проектування виробництва та розробки життєвих циклів продуктів впроваджені у постіндустріальних країнах, розвинених країнах Південно-Східної Азії та Європейському союзу [3, 4], і в теперішній час освоюються Україною [5]. Прийняті у Швеції [1], Японії [6], Китаї [7] та Таїланді [8] програми ресурсозбереження та сталого розвитку наголошують на необхідності як подовження утилізаційного ресурсу (тобто терміну служби до утилізації) устаткування й інструменту при виготовленні будь-якого продукту, так і пропонують перспективні напрями їх утилізації. Наприклад, одним з таких напрямів є використання подрібненої штампової сталі в якості сировини для порошкової металургії (Powder metallurgy) та технологій Metal injection molding (MIM), якими отримують металовироби широкого вжитку прецизійної точності із прогнозованим комплексом властивостей [8]. Слід відзначити, що у сучасних реєстрах професій – «інженер з утилізації» занесений до топ-10 найбільш затребуваних професій майбутнього [9, 10].

Штампи горизонтально-кувальних машин (ГКМ) є досить складним та дорогавартісним інструментом, тому подовження їх утилізаційного ресурсу є актуальним напрямом досліджень, що поєднує у собі наукові проблеми декількох галузей: промислової екології, охорони довкілля, матеріалознавства і термічної обробки та обробки матеріалів тиском. Від темпів утворення і процесів утилізації відходів промислових підприємств, зокрема, зношених або таких, що вийшли з ладу, штампів, залежить ресурсозберігаючий і економічний ефект за рахунок формування більш низької собівартості та більш високої конкурентоспроможності продукції, мінімізації поточних витрат підприємства на процеси переробки відходів і закупівлю (або виготовлення) нових партій штампів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Штампи ГKM – відповідальний інструмент, що виготовляють зі спеціальних інструментальних сталей із вмістом хрому, молібдену або вольфраму, які характеризуються добрим прогартовуванням, високою стійкістю до зношування, хорошим опором пластичній деформації при високих температурах, термічній та механічній втомі. У Північній Америці розповсюджені штампові сталі за стандартами American Iron and Steel Institute (AISI). R. Shivpuri у роботі [11] розглянув не лише технології виготовлення штампів з таких сталей (у тому числі штампів ГKM, що відковують із спеціальних штампових кубиків або виготовляють спеціальними методами литва) і варіантів їх термічної обробки, але і виконав оцінку факторів, які впливають на термін служби штампів, та описав міри безпеки, яких треба дотримуватись при виготовленні, ремонті та відновленні штампів. Важливість вибору штампової сталі із вмістом вольфраму та хрому була висвітлена авторами статті [12] з прив'язкою до типу задіяної у виробництві ковальсько-пресової машини, у тому числі і ГKM. Це пов'язане із особливостями кінематичної взаємодії між інструментом та заготовкою, термо-механічними умовами деформації, властивостями заготовки, яку деформують. В. Buchmaug в роботі [13] показав, що стійкість штампів є значним економічним чинником при визначенні ефективності виробництва, при цьому прогнозування стійкості штампів є вельми ускладненим та пов'язаним із визначенням домінуючого механізму пошкодження, який визначає подальші напрями протидії виходу з ладу, ремонту або утилізації відпрацьованого інструменту. В даній роботі [13] також вказано на переваги азотування перед іншими технологіями поверхневої обробки робочих частин штампів. Z. Gronostajski із співавторами [14] описав характерні явища, які відбуваються на поверхні штампів для гарячого штампування (на прикладі штампування шестерні). При цьому було виявлено, що найбільш несприятливим чинником, якій впливає на зниження стійкості штампів, є термомеханічна втома, в результаті якої дрібні тріщини швидко переростають у тріщини сітки розпалу, що розповсюджуються по контактній поверхні. Крім того, інтенсивний плин матеріалу заготовки, яка пластично деформується, по поверхні штампу викликає абразивне зношування штампів [14]. Подовження терміну роботи штампів для гарячого штампування є центральною проблемою роботи [15], в якій розроблені моделі тертя та зношування робочої поверхні штампів гарячого штампування, що враховують особливості напружено-деформованого стану інструменту. Проведене дослідження містить результати, які описують причини виходу інструменту з ладу, в тому числі через неточності у системі «ковальська машина-інструмент-заготовка», та рекомендації із зменшення зносу і термічних навантажень [15]. Подібний аналіз, що виявив вплив точності системи «прес-штамп» на стійкість штампового інструменту, був проведений у роботі [16].

P. Widomski та співавтори у роботі [17] ставили за мету підвищення довговічності роботи штампів із сталі Unimax для гарячого штампування за рахунок термохімічної обробки азотуванням, поєднаною із нанесенням PVD-покривів та покривів на основі нітриду хрому. Ефект підвищення стійкості був підтверджений при розвитку таких комплексних методів дослідження, як експлуатаційні випробування, визначення ступеню зносу за допомогою 3D-сканування, аналіз змін поверхневого шару інструментів за допомогою скануючого електронного мікроскопу, оцінка мікроструктури та вимірювання мікротвердості [17]. Як інструмент для дослідження напружено-деформованого стану поверхневих шарів робочих поверхонь штампів, за яким непрямо оцінюють їх стійкість, широко використовують метод скінчених елементів (МСЕ) [14, 15, 18]. У роботі [18] було розроблено метод оцінки стійкості штампів за критеріями зносу і пластичної деформації, яку визначали МСЕ, та визначено, що термін експлуатації штампу значно скорочується через термічне розміщення поверхневого шару, яке викликане високим тепловим навантаженням та подовженим часом контакту штампу з матеріалом, що деформують. Тому, як найбільш значні фактори, що впливають на термін експлуатації штампів ГKM, можна вказати швидкість деформування та температуру розігріву штампу. В роботі [19] вказано на перспективність топографічної оцінки поверхні деформуючого інструменту при дослідженні його зношування та виходу з ладу, в тому числі за критеріями поломок.

Мета роботи – аналіз причин руйнування та стійкості штампів із сталі 5XHM для ГKM з метою знаходження технологічних шляхів запобігання розтріскування робочих поверхонь та подовження утилізаційного ресурсу інструменту.

Виклад основного матеріалу. Особливість утворення відходів із швидкозношуваного інструменту для гарячої деформації залежить від багатьох чинників: гарний стан ковальсько-

пресового обладнання; правильне та надійне кріплення інструменту; габаритні розміри та маса; силове навантаження; своєчасне очищення від окалини та ремонт поверхні; тип та властивості матеріалу, що оброблюється деформацією, та ін. При цьому виникає необхідність структуризації та кількісної оцінки різних видів штампного інструменту з урахуванням витрат на його відновлення або вибір типу переробки.

В Україні штампний інструмент випускається в досить широкому асортименті як за розмірами і конструкцією, так і за складністю геометрії. Молотові штампи та штампи для гарячої штамповки є швидкозношуваним оснащенням. Економія витрат штампів зазвичай досягається поліпшенням їх конструкції, використанням зносостійких та ударостійких сталей, застосуванням більш досконалих методів виготовлення, підвищенням стійкості, своєчасністю і високою якістю ремонту [20, 21].

Питання про відновлення робочої поверхні розглядається зазвичай в тому випадку, коли вартість нового штампу в кілька разів вище витрат на відновлення. Таке співвідношення витрат характерно для високовартісних середньо- та великогабаритних штампів, процес відновлення яких включає: відпал для зниження твердості, механічну обробку або абразивну зачистку з метою видалення наслідків зносу, наплавлення шару з наступною механічною обробкою для доведення до потрібних розмірів і остаточну термічну обробку для досягнення необхідних механічних і експлуатаційних характеристик. Кількість капітальних поновлень поверхні штампу в середньому складає 3-4 та обумовлено мінімально допустимою висотою штампа [22]. Нажаль ситуація з малими штампами зовсім інша: їх висота не дозволяє якісно виконати відновлення гравюри, а кількість і обсяги використання досить великі, тож і витрати часу на їх відновлення також великі, тому єдиним виходом подовження утилізаційного ресурсу цих штампів є уповільнення процесу відходу утворення, чого можна досягти, використовуючи якісніший та довговічніший інструмент, який витримує більше робочих циклів.

З метою детальнішого вивчення проблеми були оцінені результати дослідження причин виходу з ладу штампів з сталі 5ХНМ, які були виконані із гарячекатаних заготовок, перекованих до форми куба зі стороною 63 мм. Хімічний склад відібраних проб відповідав ГОСТ 5950. Твердість після кування заготовки штампу становила HRC 22-26. Перед обробкою різанням для зняття напружень заготовки піддавалися відпалу на твердість HRC 18-22. Після остаточної термообробки твердість виробу знаходилась у межах HRC 45-49, що відповідає технічним вимогам.

Штампи використовувались для кування машиною ВА1132 (зусилля 1600 кН) деталей простої форми – головок скоб і поручнів діаметром 40 мм. Перед початком експлуатації за прийнятою в цеху технологією штамп прогрівали до 80-100°C. Після кожного вилучення заготовки гравюра штампа автоматично обдувалась стисненим повітрям для запобігання розвитку процесів термічного відпуску і втрати твердості.

Типові руйнування з утворенням тріщин різного походження наведено на схемі (рис. 1).

За типами руйнувань у попередніх дослідженнях [23] було отримано такий статистичний розподіл у виборці з 73 штампів: тріщини термомеханічного походження (сітка розжару) – 44% випадків, тріщина механічної втоми (тріщина кільцевої форми) – 9%, наявність сітки розжару та кільцевої тріщини разом – 43%, пластична деформація чи опливання елементів (кромки) гравюри – 4%. Схожий перелік видів руйнування наведено також в роботі [24]. Статистично розраховано, що стійкість найбільшої частки штампів (46%) після типового режиму термообробки (модальна стійкість) становить 6100 кованок (рис. 2).

Крім основної групи штампів з середньою стійкістю є досить маленька група штампів (2,5%), яка продемонструвала стійкість 9,5-10,2 тис. кованок (рис. 2), що вказує на можливий потенціал робочої стійкості. Отже встановлення причин такої стійкості допоможе виявити шляхи підвищення якості та довговічності інструменту.

Вибіркові металографічні дослідження штампів дозволили встановити, що типи руйнування робочої поверхні пов'язані з дією різних факторів або комплексів декількох факторів.

Наприклад, одночасний вплив внутрішніх напружень, обумовлених високою твердістю, та зовнішніх, пов'язаних з концентратором напружень у гравюрі, підвищують під час деформації ймовірність появи швидко зростаючих глибоких тріщин, що веде до передчасного зняття штампу з експлуатації. Металографічне дослідження кільцевої тріщини у перетині штампу (рис. 3) показало, що за усіма ознаками це руйнування втомного типу: тріщина має форму сходинок, горизонтальні ділянки яких розташовані у ліквіційних смугах фосфору, де зазвичай бі-

льша крихкість металу і злам менш енергомісткий. Аналогічні спостереження було зроблено у мікроструктурі штампів декількох плавкових складів, вміст фосфору в яких не перевищував стандартні вимоги до хімічного складу сталі.

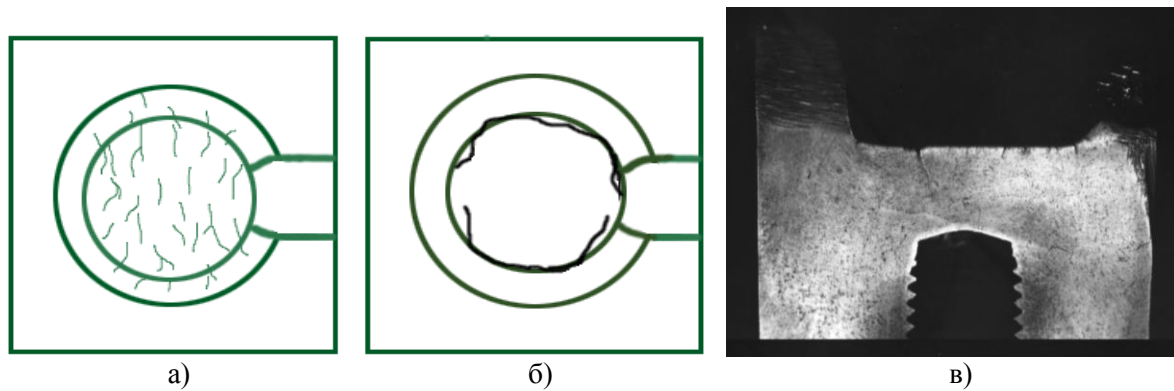


Рис. 1 – Типові схеми руйнування робочих поверхонь у штампах зі сталі 5XHM: а) – (вид зверху) шляхом утворення сітки тріщин розжару; б) – шляхом утворення тріщин втоми поряд з концентратором напружень; в) – (вид збоку) макротемплет штампу у вертикальному перетині з помітними тріщинами робочої поверхні (зменшено)

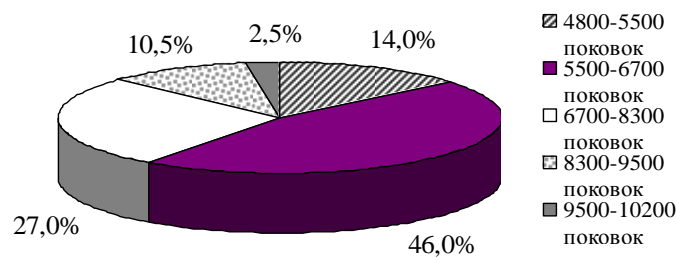


Рис. 2 – Оцінка стійкості штампів зі сталі 5XHM, оброблених за типовим режимом термообробки

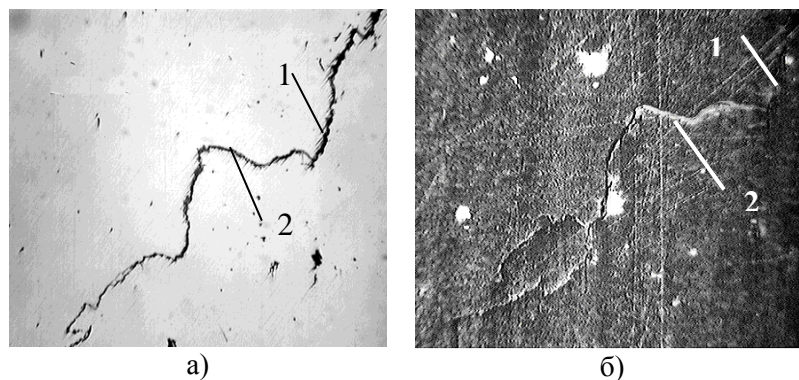


Рис. 3 – Мікроструктура кільцевої тріщини у вертикальному перетині штампа ($\times 100$): а) – структура у нетравленому стані та помітними поруч з тріщиною неметалевими частинками; б) – після обробки реактивом Обергофера, що виявляє ліквідацію фосфору у вигляді світлих смужок; 1 – вертикальна ділянка тріщини, що бере початок з концентратора напружень; 2 – горизонтальна ділянка у світлій ліквідаційній смужці фосфору

Наявність двох структурних факторів – ліквідаційних смужок із фосфором та частинок неметалевих включень оксидного та оксисульфідного типу – підвищують вірогідність зародження тріщин розжару. До того ж в цій групі середню експлуатаційну стійкість мають штампи з ви-

раженою орієнтацією тріщин розжару в гравюрі (див. рис. 1, а), а максимальну стійкість (близько до 10 тис. поковок) мають окремі штампи з тріщинами розжару, яким притаманне більш хаотичне розташування. Металографічний аналіз підтвердив висунуте раніше припущення, що в них вертикальна ось симетрії гравюри є співвісною з віссю прокатки заготовки.

Порівняльний аналіз стійкості штампів показав, що саме підвищення твердості до 48-49 HRC стимулює утворення кільцевої тріщини втомного типу та максимально знижує стійкість штампів до 3,5-5,5 тис. поковок (рис. 4). З іншого боку падіння твердості до 42-44 HRC також дає не найвищі показники стійкості – від 5,6 до 8,5 тис. поковок (рис. 4). Отже оптимальним діапазоном твердості для штампів з 5ХНМ буде 44-48 HRC.

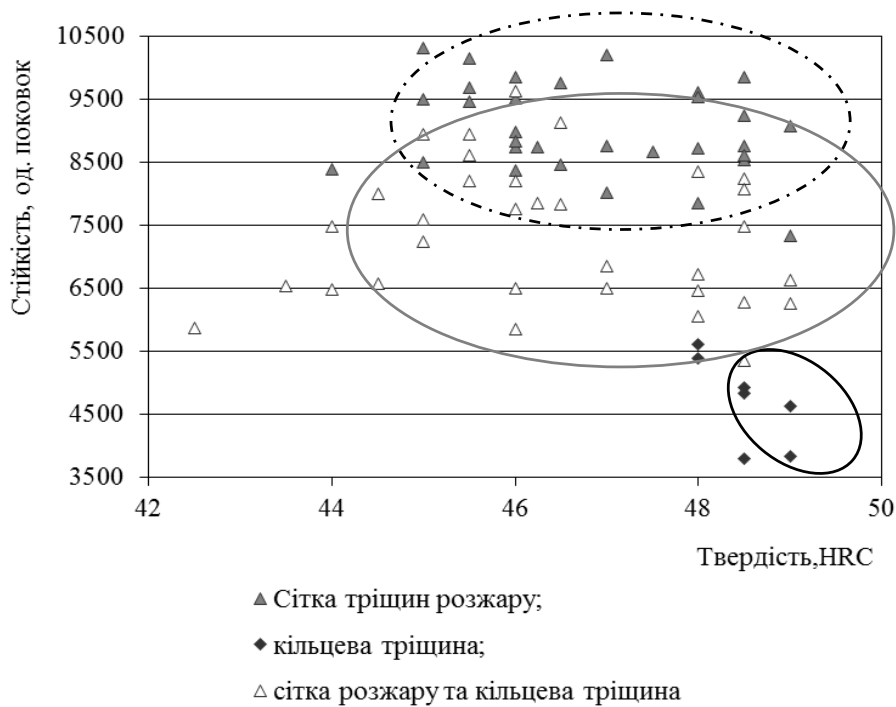


Рис. 4 – Вплив твердості та типу руйнування на експлуатаційну стійкість штампів [23]

Відомо, що запобігти розтріскуванню будь-якої природи можна підвищуючи ударну в'язкість сталі, що можливо або застосуванням більш в'язких сталей, або оброблюючи сталь за новим режимом термообробки. Оскільки зазвичай сталі з підвищеною в'язкістю леговані дефіцитними й дороговартісними легувальними елементами, то доцільніше розглянути варіант заміни технології термообробки.

Обираючи технологію термообробки, слід віддати перевагу режимам, які підвищують хімічну та структурно однорідність сталі, подрібнюють зерно і, за рахунок цього, підвищують комплекс механічних властивостей в цілому. Однією з таких технологій є термоциклічна обробка (ТЦО), під дією котрої більш інтенсивно протікають процеси дифузії, відбувається сфероїдизація розчинних неметалевих включень та завдяки багаторазовим фазовим переходам подрібнюється зерно [25].

Досвід використання режимів ТЦО для обробки штампових сталей показав, що ТЦО із заключним гартуванням у масло та подальшим відпуском утворює в сталі дрібнозернисту, однорідну троостито-сорбітну структуру з підвищеними показниками ударної в'язкості [26].

Для випробувань на стійкість були використані 8 штампів зі сталі 5ХНМ, напрямок прокату заготовки під час кування та вирізання гравюри в яких було враховано. У лабораторних умовах їх термічно обробили за розробленим двоцикловим режимом ТЦО з нагрівом до 840°C, охолодженням між циклами на повітрі до 450°C, загартуванням з другого нагріву, подальшим відпуском на твердість 44-48 HRC. Випробування стійкості штампів відбувалися в заводських умовах на ГKM BA1132 та показали, що виникнення кільцевої тріщини на інструмен-

ті після ТЦО відповідає більш пізнім часовим термінам. Якщо у штампах після типового гартування з відпусткою ця тріщина ставала помітною через 45...65% відпрацьованого часового ресурсу штампа, то у штампах після описаного режиму з термоциклічним нагрівом – через 80...85% ресурсу. Стійкість експериментальних штампів в середньому склала 10260 поковок, що не перевищує найбільшу стійкість поодиноких штампів, оброблених за типовим режимом (приблизно 10400 поковок), але на 68% ($10260/6100 = 1,68$) перевищує модальну (середню) стійкість. До переваг застосованого технологічного підходу потрібно віднести й меншу кількість утворених тріщин розжару та можливість формування більшої кількості поковок в цілому штампі (до початку процесу його розтріскування), що безсумнівно підвищує якість поковок: точніші розміри та кращий стан поверхні самої поковки.

Висновки

Проаналізовано тенденції з питань використання штампового інструменту, можливості відновлення робочих поверхонь, шляхи підвищення утилізаційного ресурсу та актуальність застосування у ковальсько-пресовому виробництві принципів циркулярної («зеленої») економіки, що обумовлено необхідністю збереження ресурсної бази в умовах дефіциту якісної сировини, який загострюється темпами вичерпності рудних ресурсів і постійним зростанням цін на інструментальні сталі.

Показано, що малогабаритні штампи у порівнянні з крупно- та середньогабаритними мають значно меншу ресурсоефективність, бо не підлягають відновленню та відпрацьовують лише один робочий термін. До того ж стійкість штампів однієї конструкції дуже варіюється, залежно від типу руйнування, який обумовлений стохастичним комплексом чинників: хімічною неоднорідністю сталі, технологічними переробками заготовки під штамп, якістю обслуговування, станом обладнання та ін. Уповільнення процесу відходоутворення можна досягти використанням якіснішого інструменту, якій витримуватиме більшу кількість кувальних циклів. Встановлено причини виходу з ладу штампів із сталі 5ХНМ для ГKM BA1132, виявлено взаємозв'язок між стійкістю та особливостями структури і твердістю. Шляхом тестування в заводських умовах визначено, що врахування напрямку осі прокатки заготовки під штамп та застосування термоциклічної обробки з подальшим гартуванням та відпуском на твердість 44-48 HRC дозволяє підвищити стійкість штампів на 68%. Таким чином, розробка технологічних заходів, спрямованих на подолання причин розтріскування, а також використання видів термічної обробки, які підвищують хімічну, структурну однорідність та ударну в'язкість сталі, запобігають передчасному руйнуванню робочих поверхонь і в цілому сприяють подовженню утилізаційного ресурсу штампового інструменту.

Перелік використаних джерел:

1. Product design for resource efficiency: Background paper / W. Ijomah, T.C. McAlone, W.R. Stahel, J.-E. Sundgren, J. Ahlqvist. – Stockholm, 2014. – 22 p. – Mode of access: <http://www.mistra.org/wp-content/uploads/2018/01/Product-design-for-resource-efficiency.pdf>.
2. Stahel W.R. The Utilization-Focused Service Economy: Resource Efficiency and Product-Life Extension / W.R. Stahel // The Greening of Industrial Ecosystems. – Washington, DC: National Academy Press, 1994. – Pp. 178-190.
3. Oosterhuis F.H. Product policy in Europe: new environmental perspectives / F.H. Oosterhuis, F. Rubik, G. Scholl. – Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1996. – 313 p. – Mode of access: <https://doi.org/10.1007/978-94-009-0277-0>.
4. A novel green design method using electrical products reliability assessment to improve resource utilization / J.-G. Zhou, L.-L. Li, M.-L. Tseng, A. Ahmed, Z.-X. Shang // Journal of Industrial and Production Engineering. – 2021. – Mode of access: <https://doi.org/10.1080/21681015.2021.1947402>.
5. Федорчук Я. Циркулярна економіка. Організаційно-правові аспекти / Я. Федорчук, Д. Серветник. – Режим доступу : <https://www.businesslaw.org.ua/circle-economic-t>.
6. Tanaka I. Promotion of Resource Efficiency in Japan – through 3R (Reduce, Reuse and Recycle) policies / I. Tanaka. – Östersund : ITPS, 2008. – 29 p. – Mode of access: <https://www.tillvaxtanalys.se/download/18.62dd45451715a00666f1df8f>.
7. Хоменко О.В. Циркулярна економіка – основа сталого розвитку КНР / О.В. Хоменко. – Ре-

- жим доступу : <https://sinologist.com.ua/homenko-o-v-tsyrkulyarna-ekonomika-osnova-stalogo-rozvytku-knr>.
8. Material research for environmental sustainability in Thailand: current trends / P. Niranatlumpong, N. Ramangul, P. Dulyaprapan, S. Nivitchanyong, W. Udomkitdecha // *Science and Technology of Advanced Materials*. – 2015. – Vol. 16 (3). – Pp. 1-6. – Mode of access: <https://doi.org/10.1088/1468-6996/16/3/034601>.
 9. ТОП-10 професій майбутнього [Електронний ресурс] : [Веб-сайт]. – Електронні дані. – Режим доступу : <https://sites.google.com/site/top10profesijmajbutnog>.
 10. ТОП-10 професій майбутнього [Електронний ресурс] : [Веб-сайт]. – Електронні дані. – Режим доступу : <https://roz.otg.dp.gov.ua/ua/novini-ta-podiyi/novini/top-10-profesij-majbutnogo>.
 11. Shivpuri R. Dies and Die Materials for Hot Forging / R. Shivpuri // *ASM Handbook. Metalworking: Bulk Forming*. – Vol. 14A. – ASM International, 2005. – Pp. 47-61. – Mode of access: <https://doi.org/10.31399/asm.hb.v14a.a0003975>.
 12. Study and selection of hot forging die materials and hardness / S. Madhankumar, K.R. Hari Narayanan, V. Harini, K.V. Gokulraj, S. Selvakumar, R. Dharshini, K. Dharshini, T.R. Hari Krishnan // *Materials Today: Proceedings*. – 2021. – Vol. 45 (7). – Pp. 6563-6566. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.472>.
 13. Buchmayr B. Damage, Lifetime, and Repair of Forging Dies / B. Buchmayr // *Berg- und Huttenmännische Monatshefte (BHM)*. – 2017. – Vol. 162. – Pp. 88-93. – Mode of access: <https://doi.org/10.1007/s00501-016-0566-3>.
 14. The failure mechanisms of hot forging dies / Z. Gronostajski, M. Kaszuba, S. Polak, M. Zwierzchowski, A. Niechajowicz, M. Hawryluk // *Materials Science and Engineering: A*. – 2016. – Vol. 657. – Pp. 147-160. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.01.030>.
 15. Tribology in Hot Forging / B.-A. Behrens, A. Bouguecha, I. Lüken, J. Mielke, M. Bistrion // *Comprehensive Materials Processing*. – Elsevier, 2014. – Vol. 5. – Pp. 211-234. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-096532-1.00538-0>.
 16. Диамантопуло К.К. Компенсация несоосности системы «пресс-штамп» изношенного штамповочного оборудования / К.К. Диамантопуло, В.В. Кухарь, А.И. Евтеев // *Металлургические процессы и оборудование*. – 2005. – № 2. – С. 31-34.
 17. Development of a method of increasing the wear resistance of forging dies in the aspect of tool material, thermo-chemical treatment and PVD coatings applied in a selected hot forging process / P. Widomski, M. Kaszuba, D. Dobras, O. Zindulka // *Wear*. – 2021. – Vol. 477. – Pp. 1-9. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.203828>.
 18. Estimation of die service life against plastic deformation and wear during hot forging processes / D.H. Kim, H.C. Lee, B.M. Kim, K.H. Kim // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2005. – Vol. 166 (3). – Pp. 372-380. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.07.103>.
 19. Methodology for tool wear analysis by a simple procedure during milling of AISI H13 and its impact on surface morphology / M.T. Prado, A. Pereira, J.A. Pérez, T.G. Mathia // *Procedia Manufacturing*. – 2017. – Vol. 13. – Pp. 348-355. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.09.090>.
 20. Палей М.М. Технология производства приспособлений, пресс-форм и штампов / М.М. Палей. – М. : Машиностроение, 1979. – 293 с.
 21. Боков В.М. Конструювання та виготовлення штампів. Штамп як об'єкт проектування: навчальний посібник / В.М. Боков. – Кіровоград : Поліграфічно-видавничий ТОВ «Імекс-ЛТД», 2005. – 216 с.
 22. Мендельсон В.С. Технология изготовления штампов и пресс-форм / В.С. Мендельсон, Л.И. Рудман. – М. : Машиностроение, 1982. – 207 с.
 23. Иващенко В.Ю. Анализ причин разрушения гравюры и повышения стойкости штампового инструмента из стали 5ХНМ с помощью ТЦО / В.Ю. Иващенко // *Захист металургійних машин від поломок : Зб. наук. пр. / ПДТУ*. – Маріуполь, 2006. – Вип. 9. – С. 46-49.
 24. Дудецкая Л.Р. Материалы и технологии изготовления литого штампового инструмента / Л.Р. Дудецкая, Ю.Г. Орлов. – Минск : Беларус. навука, 2010. – 171 с.
 25. Лыгденов Б.Д. Термоциклирование. Структура и свойства / Б.Д. Лыгденов, Ю.П. Хараев, А.Д. Грешилов, А.М. Гурьев. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2014. – 251 с.
 26. Иващенко В.Ю. Использование термоциклирования для обработки штампов / В.Ю. Ива-

щенко, А.П. Чейлях // Вісник Приазовського державного технічного університету : Зб. наук. пр. / ПДТУ. – Маріуполь, 2011. – Вип. 22. – С. 108-112. – (Серія : Технічні науки). – Режим доступу: <http://eir.pstu.edu/handle/123456789/1568>.

References:

1. Ijomah W., McAloone T.C., Stahel W.R., Sundgren J.-E., Ahlqvist J. Product design for resource efficiency: Background paper. Stockholm, 2014. 22 p. Available at: <http://www.mistra.org/wp-content/uploads/2018/01/Product-design-for-resource-efficiency.pdf> (accessed 15 December 2020).
2. Stahel W.R. The Utilization-Focused Service Economy: Resource Efficiency and Product-Life Extension. *The Greening of Industrial Ecosystems*, 1994, pp. 178-190.
3. Oosterhuis F.H., Rubik F., Scholl G. Product policy in Europe: new environmental perspectives. Dordrecht, Kluwer Academic Publ., 1996. 313 p. doi: **10.1007/978-94-009-0277-0**.
4. Zhou J.-G., Li L.-L., Tseng M.-L., Ahmed A., Shang Z.-X. A novel green design method using electrical products reliability assessment to improve resource utilization. *Journal of Industrial and Production Engineering*, 2021. doi: **10.1080/21681015.2021.1947402**.
5. Fedorchuk Ya., Servetnyk D. *Tsyrukuliarna ekonomika. Orhanizatsiino-pravovi aspekty* (Circular economy. Organizational and legal aspects) Available at: <https://www.businesslaw.org.ua/circle-economic-t> (accessed 05 January 2020). (Rus.)
6. Tanaka I. Promotion of Resource Efficiency in Japan – through 3R (Reduce, Reuse and Recycle) policies. Östersund, ITPS Publ., 2008, 29 p. Available at: <https://www.tillvaxtanalys.se/download/18.62dd45451715a00666f1df8f> (accessed 10 February 2020).
7. Khomenko O.V. *Tsyrukuliarna ekonomika – osnova staloho rozvytku KNR* (The circular economy is the basis of China's sustainable development) Available at: <https://sinologist.com.ua/homenko-o-v-tsyrukulyarna-ekonomika-osnova-stalogo-rozvytku-knr> (accessed 10 February 2020). (Rus.)
8. Niranatumpom P., Ramangul N., Dulyaprapan P., Nivitchanyong S., Udomkitdecha W. Material research for environmental sustainability in Thailand: current trends. *Science and Technology of Advanced Materials*, 2015, vol. 16 (3), pp. 1-6. doi: **10.1088/1468-6996/16/3/034601**.
9. *TOP-10 profesii maibutnoho* (TOP-10 professions of the future) Available at: <https://sites.google.com/site/top10profesijmajbutnog> (accessed 10 January 2020). (Rus.)
10. *TOP-10 profesii maibutnoho* (TOP-10 professions of the future) Available at: <https://roz.otg.dp.gov.ua/ua/novini-ta-podiyi/novini/top-10-profesij-majbutnogo> (accessed 10 January 2020). (Rus.)
11. Shivpuri R. Dies and Die Materials for Hot Forging. *ASM Handbook. Metal-working: Bulk Forming*, vol. 14 A, 2005, pp. 47-61. doi: **10.31399/asm.hb.v14a.a0003975**.
12. Madhankumar S., Hari Narayanan K.R., Harini V., Gokulraj K.V., Selvakumar S., Dharshini R., Dharshini K., Hari Krishnan T.R. Study and selection of hot forging die materials and hardness. *Materials Today: Proceedings*, 2021, vol. 45 (7), pp. 6563-6566. doi: **10.1016/j.matpr.2020.11.472**.
13. Buchmayr B. Damage, Lifetime, and Repair of Forging Dies. *Berg- und Huttenmännische Monatshefte (BHM)*, 2017, vol. 162, pp. 88-93. doi: **10.1007/s00501-016-0566-3**.
14. Gronostajski Z., Kaszuba M., Polak S., Zwierzchowski M., Niechajowicz A., Hawryluk M. The failure mechanisms of hot forging dies. *Materials Science and Engineering: A*, 2016, vol. 657, pp. 147-160. doi: **10.1016/j.msea.2016.01.030**.
15. Behrens B.-A., Bouguecha A., Lüken I., Mielke J., Bistron M. Tribology in Hot Forging. *Comprehensive Materials Processing*, 2014, vol. 5, pp. 211-234. doi: **10.1016/b978-0-08-096532-1.00538-0**.
16. Diamantopulo K.K., Kukhar V.V., Evteev A.I. Kompensaciya nesoosnosti sistemy «press-shtamp» iznoshennogo shtampovochnogo oborudovaniya [Compensation for the «press-die» system misalignment of worn-out die-forging equipment]. *Metallurgicheskie processy i oborudovanie – Metallurgical processes and equipment*, 2005, no. 2, pp. 31-34. (Rus.)
17. Widomski P., Kaszuba M., Dobras D., Zindulka O. Development of a method of increasing the wear resistance of forging dies in the aspect of tool material, thermo-chemical treatment and PVD coatings applied in a selected hot forging process. *Wear*, 2021, vol. 477, pp. 1-9. doi: **10.1016/j.wear.2021.203828**.
18. Kim D.H., Lee H.C., Kim B.M., Kim K.H. Estimation of die service life against plastic deformation and wear during hot forging processes. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, vol. 166 (3), pp. 372-380. doi: **10.1016/j.jmatprotec.2004.07.103**.

19. Prado M.T., Pereira A., Pérez J.A., Mathia T.G. Methodology for tool wear analysis by a simple procedure during milling of AISI H13 and its impact on surface morphology. *Procedia Manufacturing*, 2017, vol. 13, pp. 348-355. doi: 10.1016/j.promfg.2017.09.090.
20. Palei M. M. *Tekhnolohyia proyzvodstva prysposoblenni, press-form y shtampov* [Technology of production of devices, compression molds and stamps]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1979. 293 p. (Rus.)
21. Bokov V.M. *Konstruiuvannia ta vyhotovlennia shtampiv. Shtamp yak ob'iekt proektuvannia: navchalnyi posibnyk* [Design and manufacture of dies. Stamp as an object of design: a textbook]. Kirovohrad, Polihrafichno-vydavychyi TOV «Imeks-LTD» Publ., 2005. 216 p. (Ukr.)
22. Mendelson V.S., Rudman L.Y. *Tekhnolohyia yzghotovleniia shtampov y press-form* [Technology of production of stamps and molds]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1982. 207 p. (Rus.)
23. Ivashchenko V.Yu. Analiz prychn razrusheniia hraviuri y povisheniia stoikosti shtampovoho ynstrumenta yz staly 5KhNM s pomoshchiu TTsO [Analysis of the engraving destruction causes and the increase in the 5CrNiMo steel die-tool life using thermocycling process (TCP)]. *Zakhyst metalurhiinykh mashyn vid polomok – Protection of metallurgical machines from breakdowns*, Mariupol, 2006, vol. 9, pp. 46-49. (Rus.)
24. Dudetskaia L.R., Orlov Yu.H. *Materyaly u tekhnolohyy yzghotovleniia lytoho shtampovoho ynstrumenta* [Materials and technologies for the manufacture of cast die tools]. Mynsk, Belarus. navuka Publ., 2010. 171 p. (Rus.)
25. Lyhdenov B.D., Kharaev Yu.P., Hreshylov A.D. *Termotsyklyrovanye. Struktura y svoistva* [Thermocycling. Structure and properties]. Barnaul, AltSTU Publ., 2014. 251 p. (Rus.)
26. Ivashchenko V.Yu., Cheiliakh A.P. Ispol'zovanie termociklirvaniya dlya obrabotki shtampov [Using the thermocycling to dies processing]. *Visnik Priazovs'kogo Derzhavnogo Tekhnichnogo Universitetu. Serii: Tekhnichni nauki – Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical sciences*, 2011, vol. 22, pp. 108-112. (Rus.)

Рецензент: А.В. Кальянов
д-р мед. наук, проф., ДВНЗ «ПДТУ»

Стаття надійшла 15.04.2021

УДК 628.4.061-08:622.807.8:656.614.35

doi: 10.31498/2225-6733.42.2021.240680

© Кухар В.В.*

ОЦІНКА ПИЛОУТВОРЕННЯ НА ВІДКРИТИХ ТЕРМІНАЛАХ МОРСЬКИХ ПОРТІВ ПРИ ПЕРЕВАНТАЖЕННІ ТА ЗБЕРІГАННІ ВУГІЛЛЯ

Проаналізовано стан перевалки кам'яного вугілля у морських портах України у 2019-2020 рр., умови його перевантаження та зберігання з точки зору викидів в атмосферне повітря вугільного пилу та негативного впливу на працівників, навколишнє середовище, прилеглі житлові та селбищні зони, робочі машини і механізми. Визначені розрахункові параметри для оцінки викидів пилу при перевантаженні вугілля грейферним способом та зберіганні на відкритих складах терміналів морських портів України. Виконано оцінку кількості вугільного пилу, який викидається у атмосферне повітря при перевантаженні і відкритому зберіганні кам'яного вугілля, для загальних масштабів перевалки у морських портах України у вказані роки. Показані перспективи розробки та застосування методів і засобів зменшення кількості пилу при перевантаженні і зберіганні кам'яного вугілля у морських портах.

Ключові слова: кам'яне вугілля, перевантаження, зберігання, викиди вугільного пилу, пилоутворення, морські порти, відкриті склади, грейферний спосіб.

* д-р техн. наук, професор, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, ORCID: 0000-0002-4863-7233, kvv.mariupol@gmail.com

V.V. Kukhar. Assessment of dust formation at the open seaport terminals during coal handling and storage. The state of coal handling (transshipment) in the seaports of Ukraine for the last years (2019-2020) has been considered. The conditions of coal reloading and storage in terms of coal dust emissions (dust formation) into the air and their negative impact on the health of workers, on the environment state, on adjacent residential areas and settlement zones, on the work of port equipment, machinery and mechanisms have been analyzed. The scale and prospects of coal mining, development of coal energy and coal consumption in the world and in Ukraine have been shown; the priorities of protection of the person and environment by the methods of dust formation reduction at coal transshipment and storage have been defined. It has been revealed that the existing methods for calculating dust emissions during coal handling, transshipment and open storage, which are currently used, are outdated and must be developed. The necessity to keep strictly to the sanitary legislation and maintain the sanitary protection zones of the proper sizes has been shown. The calculated parameters for dust emissions estimation during the coal transshipment by grab method and storage in the open warehouses of the seaports of Ukraine and the State Enterprise «Mariupol Sea Commercial Port» have been determined. The calculations take into account the factors of coal humidity, conditions of its reloading and storage (average discharge height, grab method, open warehouses on four sides) and climatic conditions (wind speed). The amount of coal dust emitted into the atmosphere during the overloading by the grab method and storage of the coal in the open warehouses of seaport terminals has been estimated. As a result, it has been shown that in transporting coal over Ukraine in 2019 at least 21 tons of coal dust have been formed, and in 2020 – not less than 15.4 tons of coal dust have been formed. Respectively, in the scale of the State Enterprise «Mariupol Sea Commercial Port» transportation in 2020, about 3.26 tons of coal dust have been formed. Thus, it has been shown that the development of methods and means to reduce the amount of dust during transshipment and storage of coal in seaports is a promising area of research.

Keywords: coal, transshipment, handling, storage, coal dust emissions, dust formation, seaports, open warehouses, grab method.

Постановка проблеми. Морські перевезення складають біля 60% загального обсягу перевезень вантажів у світовій торгівлі, що пов'язано з відносно низькою собівартістю переміщення вантажів великої маси на дальні відстані, високою пропускною спроможністю і низькою капіталоємністю [1]. Обсяги перевезення та перевантаження вугілля (у тому числі коксівного) залежать від сезонності, цінової кон'юнктури та, враховуючі виклики сьогодення, навіть від епідеміологічної ситуації, через яку робота портів може тимчасово призупинитись. За даними Адміністрації морських портів України [2], у портах України у 2019 р. перевалка руди склала 37,32 млн. т, а вугілля – 6,7 млн. т; відповідно, у 2020 р. перевалка руди – 44,22 млн. т, а вугілля – 4,9 млн. т. Наприклад, у п'ятому в Україні за вантажообігом Маріупольському морському торговельному порту (ММТП) у 2020 році обсяг імпорту вугілля склав 142,9 тис. т [3]. Додатково можна відзначити, що кам'яне вугілля посідає першу позицію у структурі транзитних перевезень в Україні залізничним транспортом (більше 40% від загального обсягу транзитних перевезень), і у 2017 р. обсяги його перевезення в такий спосіб склали 7,96 млн. т [4]. Процеси видобутку, перевезення, зберігання і перевантаження вугілля супроводжуються викидами вугільного пилу в атмосферне повітря, що погіршує умови роботи працівників вугільної, транспортної галузей і портової інфраструктури, негативно відбивається на стані техніки. Практика роботи з сипучими вантажами показує, що зниження запиленості є важливим не лише з точки зору захисту навколишнього середовища і здоров'я співробітників, але і з точки зору скорочення простой устаткування, зниження витрат на його обслуговування [5].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. За даними аналізу статистичного огляду світової енергетики [6] за період з 2009 р. по 2019 р. світове виробництво вугілля за енергетичним еквівалентом збільшилось з 142,89 Ексаджоулів (ЕДж) до 167,58 ЕДж (1 ЕДж = 10^{18} Дж), а зростання світового споживання вугілля відбулося у той самий період у межах від 144,53 ЕДж до 157,86 ЕДж. Оцінювання у Ексаджоулях пов'язане з різною калорійністю спалювання різних марок вугілля. Зазначимо, що світовий видобуток вугілля за рік оцінюється близько 8 Гт [7].

Згідно з класифікацією American Society for Testing and Materials виділяють чотири основних види вугілля: буре вугілля, напівбітумінозне вугілля, кам'яне вугілля та антрацит. Класифікацію вугілля ведуть за показниками вологості, вмісту природних газів і вуглецю й калорійності, від якої залежить тепло, що виділяється при його згорянні. Калорійність бурого вугілля – 10,47...20,93 МДж/кг, кам'яного вугілля – 18,84...29,31 МДж/кг, антрациту – 33,49...39,78 МДж/кг. З економічної точки зору розглядають два види вугілля: енергетичне (газове) та коксівне, що відрізняються виробничим застосуванням. В цілому, на вугільну генерацію припадає біля 38% світового споживання енергетичних ресурсів [8]. Вочевидь, що вказані обсяги вугілля не лише видобуваються, а і транспортуються світом, що супроводжується значним обсягом утворення вугільного пилу. Оцінка енергетичного потенціалу вугілля показує, що його світові запаси знаходяться на рівні 891 Гт (при усередненій калорійності 25 МДж/кг), що майже у п'ять разів перевищує потенціал урану-235, але, за сучасними темпами вичерпування ресурсів вуглеводнів, їх залишилось на 51...114 років [9] (за іншими даними [10] – на 50...150 років).

За різними оцінками загальні ресурси вугілля в Україні складають від 100 до 117,5 млрд. т (з них кам'яне вугілля і антрацити – 92...94%, буре вугілля – 6...8%) [11]. Протягом 2001-2013 рр. на українських шахтах щорічно видобувалось біля 80 млн. т вугілля, але з 2014 р., через військові дії на Донбасі, видобуток вугілля впав більш, ніж на 22% [11]. Тому для забезпечення енергетичних потреб України щорічно ініціюється закупівля (імпорт) та перевезення морським транспортом не менше 4 млн. т вугілля (переважно антрацитової групи) [11], яке перевантажують у портах (див. [2]). Перевантаження виконують відкритими способами, серед яких переважає грейферний, а зберігання вугілля у портах (взагалі то, як і на складах теплоелектростанцій) проводять на відкритих майданчиках транспортних терміналів. Перевантаження вугілля супроводжується такими втратами, як просипання, рознесення мілких фракцій вітром, що викликає суттєве забруднення території з наступним негативним впливом на довкілля та персонал. При транспортуванні напіввагонами і платформами вздовж всього полотна залізниці відбуваються втрати, що не відновлюються [12]. Основними джерелами пилоутворення виступають (за наявності) [12]: вагоноопрокидувач, стрічковий конвеєр, грейферний перевантажувач, вугілля, яке складають у штабелях на відкритих дільницях.

Пиловиділення (вітрова ерозія) з відкритих площ та складів вугілля складає до 25 800 мг/м³ (при видобутку вугілля – 730...11 000 мг/м³) [5, 12]. На вітрову ерозію суттєвий вплив має клімат, а саме процеси висушування породи гарячими вітрами, низька вологість повітря та мала кількість опадів. Для запобігання здування пилу потрібно підтримувати певну вологість верхнього шару поверхонь, що пилять, при якій рівень пиловиділення буде незначний [5, 12], тому системи зрошування широко застосовують для зниження запиленості повітря на дільницях перевантаження та зберігання вугілля [13]. Але зволоження вугілля повинно мати оптимальне значення через те, що внутрішня вологість вугілля може привести до його самозаймання. Процесу самозаймання вугілля сприяє наявність в ньому сірчаного колчедану, який, окислюючись, виділяє тепло і розпушує верхні шари шматків вугілля, відкриваючи нові поверхні для окислення. Деякий вплив на зниження температури саморозігріву надає ступінь подрібнення вугілля, тому чим сильніше вугілля подрібнене, тим більшу поверхню окислення воно має. Волога виконує роль каталізатора, прискорюючи хімічні процеси, а також призводить до розтріскування вугілля і утворення мікротріщин. Збільшується активна поверхня вугілля і зростає поглинання ним кисню. Волога змиває з поверхні вугілля окислені плівки, але надлишок вологи перешкоджає процесу окислення [12].

Відомо, що інтенсивність забруднення довкілля залежить від обсягів і фізико-хімічних властивостей вантажів, що пилять при перевантаженні у портах, використовуваного способу перевантаження і ступеня технологічної захищеності. Грейферне перевантаження та перевантаження сипучих вантажів відкритим способом супроводжується найбільш інтенсивним виділенням пилу. Порушення технологій, умов перевалки і гранично допустимих норм викидів призводить до підвищеного забруднення атмосферного повітря твердими аерозолями, а шкідливі речовини осідають на прилеглий акваторії і ґрунті [14]. Тому у містах, розташованих поблизу великих вугільних терміналів, екологічна ситуація є ідентичною до такої, що існує у шахтарських поселеннях (вугільний пил поширюється повсюдно), а концентрація неорганічного пилу в повітрі біля житлових будинків, що розташовані поблизу портової території, може у декілька разів перевищувати гранично допустиму концентрацію (ГДК) [14]. Значення ГДК для

пилу залежить від виду вугілля, з якого він утворюється при транспортуванні та зберіганні. Згідно з нормативами [15], ГДК для вугільного пилу становить: а) пил породний, вуглепородний (із вмістом вільного діоксиду кремнію SiO_2 від 10% до 70%) – ГДК = 2 мг/м^3 ; б) пил вуглепородний, вугільний ($\text{SiO}_2 = 5 \dots 10\%$) – ГДК = 4 мг/м^3 ; в) пил антрацитовий ($\text{SiO}_2 < 5\%$) – ГДК = 6 мг/м^3 ; г) пил кам'яного вугілля ($\text{SiO}_2 < 5\%$) – ГДК = 10 мг/м^3 .

За даними джерела [16] відомо, що під час розподілу пилу більше, ніж 58 кг/га в місяць спостерігається ефект пригнічення життєдіяльності більшості рослин і тварин, вдихуваний пил викликає гострі захворювання верхніх дихальних шляхів. Особливо небезпечними є частинки діаметром менше 10 мікрон (мкм) (за прийнятим у США позначенням – РМ10). На кожні 10 мікрограмів (1×10^{-5} г) на 1 м^3 збільшення концентрації у повітрі таких частинок кількість пацієнтів лікувальних установ з хронічними респіраторними захворюваннями зростає на 7%, з них 3,5% припадає на респіраторні захворювання в гострій формі й 3% – на серцево-судинні захворювання, а смертність від раку легенів зростає на 8% [16]. При цьому вказано, що з відкритих площ (складів вугілля у портах, кар'єрів) виділяється в атмосферу до 2...5 т пилу за добу.

Через це має бути заборонене перевантаження відкритим способом та зберігання на відкритих естакадах вугілля у морських портах, якщо не витримуються умови Законодавства щодо розмірів санітарно-захисних зон (СЗЗ), які визначаються Земельним Кодексом України (Стаття 114) та за нормативними документами [17, 18]. Згідно з [18], СЗЗ майданчиків складів і місць відкритого перевантаження вугілля у портах відносять до Класу II, а їх розмір повинен бути не менше, ніж 500 м. Але, за переконанням дослідників [19], вказані нормативні документи втратили своє законодавче значення, особливо у розділі 2 «Санітарно-захисні зони». Розміри СЗЗ слід визначати за сучасними науково обґрунтованими підходами [19], які включають в себе етапи аналізу санітарно небезпечних та шкідливих вантажопотоків вантажів, що пилять; опис об'єктів пилоутворення на перевантажувальних комплексах і терміналах; узагальнений аналіз концентрацій пилу, що утворюється над джерелами пилення (у тому числі при перевантаженні грейферним способом на одному або декількох майданчиках одночасно); комплексне вивчення вмісту пилу над об'єктами портових перевантажувальних комплексів; математичне і натурне моделювання процесів пилоутворення та розсіювання пилу; проведення розрахунків СЗЗ; натурну (експериментальну) перевірку ступеня розсіювання та розповсюдження пилу для підтвердження справедливості розмірів СЗЗ. При цьому доцільно використовувати нові прогресивні методи визначення концентрації пилу, наприклад, за допомогою лазерних датчиків [20]. Використання систем пилопригнічення, зрошування, екранування або аспірації не повинно впливати на зменшення розмірів СЗЗ.

Мета роботи – визначення кількості вугільного пилу, що утворюється при грейферному перевантаженні та зберіганні вугілля на відкритих складах терміналів морських портів України.

Виклад основного матеріалу. Розрахунки маси твердих частинок (пилу), що утворюються при перевантаженні вугілля грейферним способом та його зберіганні на відкритих терміналах, представляють певні складнощі, які, в першу чергу, пов'язані з відсутністю затверджених Державою методичних рекомендацій для проведення відповідних оцінок. Якщо для визначення валових викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря із відкритого складу (при зберіганні вугілля) можна застосувати методіку, що наведена у довіднику [21], яку використовують при оцінці викидів коксохімічного виробництва, то стосовно розрахунку викидів пилу при перевантаженні вугілля відомості про подібні методіки є обмеженими. Автори роботи [22] для розрахунків викидів забруднюючих речовин у процесах пересипання на кар'єрах використовували застарілі методіки або методіки інших держав [23, 24]. Як показали результати пошуку в Інтернет-джерелах, так само поступають при розробці Звітів з оцінки впливу на довкілля підприємств та портів, що пов'язані з перевантажуванням сипучих матеріалів і вугілля (наприклад, подібним чином проведені розрахунки у Звіті [25]).

Використовуючи наведені у вступі дані щодо перевантаженого вугілля та розрахункові методіки [21-25], визначимо обсяг вугільного пилу, який утворюється при перевантаженні за схемою «трюм–склад» грейфером, що встановлений на портальному крані, та при зберіганні вугілля на складі (під складом розуміється відкритий термінал, де вугілля складається насипами у штабеля).

Викиди вугільного пилу при перевантаженні вугілля розраховуємо за формулою:

$$G_{\Phi} = K_0 \cdot K_1 \cdot K_4 \cdot K_5 \cdot q_{уд} \cdot \Pi_y \cdot (1-n) \cdot 10^{-6}, \text{ т/рік}, \quad (1)$$

де K_0 – коефіцієнт, що враховує вологість вугілля; K_1 – коефіцієнт, що враховує швидкість вітру; K_4 – коефіцієнт, що враховує місцеві умови, ступінь захищеності вузла від зовнішніх впливів; K_5 – коефіцієнт, що враховує висоту пересипання матеріалу; $q_{уд} = 3,0$ г/т – питома виділення твердих частинок із тони вугілля, що надходить на склад; Π_y – кількість вугілля, що надходить на склад, т/рік; n – ефективність застосовуваних засобів пило пригнічення (у частках).

Викиди вугільного пилу при зберіганні вугілля на складі, які розраховують як кількість твердих частинок, що здуваються з поверхні насипу, визначаються за формулою:

$$G_c = 31,5 \cdot K_0 \cdot K_1 \cdot K_4 \cdot K_6 \cdot W_{ш} \cdot \gamma_{ш} \cdot (1-n) \cdot 10^3, \text{ т/рік}, \quad (2)$$

де $K_6 = S_{факт} / S_{ш} = 1,3 \dots 1,6$ – коефіцієнт, що враховує поверхню штабеля, тут $S_{факт}$ – фактична поверхня складу, м²; $S_{ш}$ – площа основи штабелів вугілля, м²; $W_{ш} = 1 \cdot 10^{-6}$ кг/м²с – питома здуваємість твердих частинок з поверхні штабеля; $\gamma_{ш} = 0,1$ – коефіцієнт подрібнення гірської маси; 31,536 – коефіцієнт переводу г/с в т/рік.

При підстановці $W_{ш}$ і $\gamma_{ш}$ одержуємо:

$$G_c = 31,536 \cdot K_0 \cdot K_1 \cdot K_4 \cdot K_6 \cdot S_{ш} \cdot (1-n) \cdot 10^{-4}, \text{ т/рік}. \quad (3)$$

Сумарна кількість викидів при перевантаженні і зберіганні вугілля:

$$G = G_{\Phi} + G_c. \quad (4)$$

Прийняті коефіцієнти для формул (1)-(3), що відповідні певним значенням характеристик процесів перевантаження та зберігання вугілля, наведені у табл. 1.

Таблиця 1

Коефіцієнти і параметри формул (1)-(3)

№	Параметр	Одиниця вимірювання	Характеристика	Коефіцієнт	Значення
1	Вологість	%	10	K_0	0,1
2	Швидкість вітру	м/с	4,6	K_1	1,2
3	Відкриті сховища	Відкриті сторони	4	K_4	1,0
4	Висота падіння матеріалу	м	4,0	K_5	1,0
5	Профіль поверхні	-	$S_{факт} / S_{ш}$	K_6	1,45
6	Засоби пилопригнічення	-	Відсутні	n	0
7	Площа основи штабелів (Всі морські склади України)	м ²	На складах сумарно	$S_{ш}$	34 000
8	Площа основи штабелів (Маріупольський морський торговельний порт)	м ²	На складі сумарно	$S_{ш}$	5 000

Пояснимо вибір коефіцієнтів за нумерацією у першому стовпці табл. 1.

№1 – Згідно з ДСТУ 7146:2010 [26], вологість вугілля залежить від його марки (Д, ДГ, Г, Ж, П, А) та розмірів кусків (від 6 мм до 200 мм) та становить від 6% до 16%. Проаналізувавши дані [26], було прийнято усереднене значення вологості 10%, якій відповідає значення $K_0 = 0,1$ [21].

№2 – Швидкість вітру щодо варіантів розрахунку для всієї України беремо з сайту [27], згідно з яким середня швидкість вітру для всієї України може бути прийнята 5,0 м/с. Для м. Маріуполь середньорічну швидкість вітру приймаємо 4,6 м/с [28]. Таким чином, обирали $K_1 = 1,2$ [21].

№3 – Перевантаження та складування вугілля проводять у штабеля терміналів, які є цілком відкритими з 4-х сторін. Тому згідно з [21] обирали $K_4 = 1,0$.

№4 – Середня висота, з якої відбувається падіння вугілля при перевантаженні, досягає 4,0 метрів (перевантаження грейфером, встановленому на порталному крані). Тому $K_5 = 1,0$ [21].

№5 – Коефіцієнт, що враховує профіль поверхні [21], брали усередненим, як $K_6 = (1,3 + 1,6)/2 = 1,45$ (див. формулу (2)).

№6 – Приймали, що засоби пилопригнічення не використовуються. Таким чином, приймали $n = 0$ [21].

№7 та №8 – Площу основи штабелів вугілля сумарно у всіх портах України приймали приблизно, як 34 000 м², при цьому площу основи штабелів, які розташовані на території Маріупольського морського торговельного порту, приймали, як 5 000 м², що потрібно для підстановки у формули (2) та (3).

Результати розрахунків за формулами (1)-(4) наведені у табл. 2.

Таблиця 2

Результати розрахунків пилоутворення при перевантаженні вугілля

№ п/п	Об'єкт	Рік	Обсяг перевалки вугілля, тис. т	G_ϕ , т/рік	G_c , т/рік	G , т/рік
1	Україна (вся)	2019	6 700	2,412	18,657	21,069
2	Україна (вся)	2020	4 900	1,764	13,645	15,409
3	Маріупольський морський торговельний порт	2020	142,9	0,0514	2,744	3,258

Слід враховувати, що майже той самий обсяг вугілля, що і G_ϕ , за виключенням малих у відсотковому відношенні втрат із пилом та невиробничих втрат при перевантаженні, буде завантажено у вагони, напіввагони або вантажні автомобілі для перевезення до споживачів, що буде супроводжуватись близькими за значенням втратами вугілля за рахунок пилоутворення. Також очікуються вторинне пилоутворення при русі вантажних засобів (автомобілів, вагонів) і при перевезенні вугілля відкритим способом.

Висновки

Проаналізовано стан перевалки кам'яного вугілля у морських портах України за останні роки (2019-2020 рр.), умови його перевантаження та зберігання з точки зору викидів в атмосферне повітря вугільного пилу (пилоутворення) та негативного впливу на працівників, навколишнє середовище, прилеглі житлові та селбищні зони, робочі машини і механізми. Показані масштаби і перспективи видобування вугілля, вугільної енергетики та споживання вугілля у світі та в Україні, визначені пріоритети захисту людини і довкілля методами зменшення пилоутворення при перевантаженні та зберіганні кам'яного вугілля. Виявлено, що наявні методики розрахунку викидів пилу при перевантаженні і зберіганні вугілля відкритим способом є застарілими та потребують розвитку. Визначені розрахункові параметри для оцінки викидів пилу при перевантаженні вугілля грейферним способом та зберіганні на відкритих складах терміналів морських портів України і ММТП. Оцінка кількості вугільного пилу, який викидається у атмосферне повітря при перевантаженні і відкритому зберіганні вугілля, показала, що в масштабах перевезень України у 2019 р. утворилось не менш 21 т вугільного пилу, а у 2020 р. – не менш 15,4 т пилу, відповідно, в масштабах перевезень ММТП у 2020 р. – біля 3,26 т пилу. Таким чином, розробка методів та засобів зменшення кількості пилу при перевантаженні і зберіганні кам'яного вугілля у морських портах є перспективним напрямком досліджень.

Перелік використаних джерел:

1. Бердина М.Ю. Морской транспорт в системе международных бизнес-операций / М.Ю. Бердина, Е.К. Горосян // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 1 (часть 1). – Режим доступа : <https://www.science-education.ru/ru/article/view?id=17841>.
2. Адміністрація морських портів України : За оперативними даними у 2020 р. морські порти

- України обробили 158,86 млн. т вантажів [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.uspa.gov.ua/pres-tsentr/novini/novini-ampu/18191-za-operativnimi-danimi-u-2020-r-morski-porti-ukrajini-obrobili-158-86-mln-t-vantazhiv>.
3. Маріупольський морський торговельний порт. Державне підприємство : У Маріупольському порту підбили підсумки роботи за 2020 рік [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://marport.net/uk/allcategories-uk-ua/14-novyny/520-u-mariupolskomu-portu-pidbili-pidsumki-roboti-za-2020-rik>.
 4. Веприцький Р.С. Аналіз та оцінка обсягів транзитних перевезень залізничним транспортом України / Р.С. Веприцький, Г.Д. Ейтутіс, С.В. Артем'єва // Вісник економіки транспорту і промисловості. – 2018. – № 62. – С. 53-63. – Режим доступу : <https://doi.org/10.18664/338.47:338.45.v0i62.133981>.
 5. Шепелина П.В. Устройство системы пылеподавления в конструкциях грузоподъемных машин угольных терминалов / П.В. Шепелина // Научные тенденции : Вопросы точных и технических наук : сб. науч. тр., по матер. XX межд. науч.-пр. конф. (12 декабря 2018 г.; Санкт-Петербург). – Изд. ЦНК МОАН, 2018. – С. 27-31. – Режим доступа : <https://doi.org/10.18411/spc-12-12-2018-10>.
 6. Statistical Review of World Energy [Electronic resource]. – 2020. – 68 p. – Mode of access : <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2020-full-report.pdf>.
 7. Добыча угля по странам мира [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://sites.google.com/site/ruregdatav1/ugol-dobycha>.
 8. Золотарева Д.С. Анализ российского рынка угля / Д.С. Золотарева // Актуальные вопросы отраслевых рынков и международной коммерции: Электронный научный студенческий журнал. – 2020. – № 2(3). – Режим доступу : <https://ti.ec.mgimo.ru/2020/2020-03/analysis-of-russian-coal-market>.
 9. Ульянин Ю.А. Прогнозирование динамики исчерпания традиционных энергетических ресурсов / Ю.А. Ульянин, В.В. Харитонов, Д.Ю. Юршина // Проблемы прогнозирования. – 2018. – № 2. – С. 60-71.
 10. Тимченко Н.П. Анализ мировых запасов энергетических ресурсов / Н.П. Тимченко, Н.М. Фиалко // Интернаука : межд. науч. журн. – 2020. – № 18. – С. 1-6. – Режим доступу : <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2020-18-6549>.
 11. Національний інститут стратегічних досліджень : Вугільна промисловість України в умовах гібридної війни : Аналітична записка [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://niss.gov.ua/doslidzhennya/nacionalna-bezpeka/vugilna-promislovisht-ukraini-v-umovakh-gibridnoi-viyini-analitichna>.
 12. Инновационные технологии : Морской порт [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://www.tumantorg.ru/uslugi/pylepodavlenie/morskoj-port.html>.
 13. Энциклопедия горного дела : Орошение [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://maxi-exkavator.ru/articles/encyclopedia/~id=1721>.
 14. Музлова Г.И. Пылящий вопрос : станет ли экологический фактор частью экономики перевалки навалочных грузов в морских портах? / Г.И. Музлова // Морские порты. – 2014. – № 4. – С. 26-29. – Режим доступу : <http://www.morvesti.ru/analitika/1692/31749>.
 15. НПАОП 10.0-1.01-05. Правила безпеки у вугільних шахтах (Затверджені Державним комітетом України з нагляду за охороною праці від 16.11.2004, №257). – Режим доступу : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0327-05#Text>.
 16. Основные средства : Эх, дороги, пыль да туман. (Часть 1). Современные технологии и оборудование для подавления пыли [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://os1.ru/article/4316-sovremennye-tehnologii-i-oborudovanie-dlya-podavleniya-pyli-eh-dorogi-pyl-da-tuman-ch-1>.
 17. ДСП 173-96. Державні санітарні правила планування та забудови населених пунктів (Затверджені наказом МОЗ України від 19.06.1996 р., №173). – Режим доступу : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0379-96#Text>.
 18. ДСанПіН 7.7.4.-046-99. Державні санітарні правила і норми для морських та річкових портів (Затверджено Постановою Головного держ. сан. лікаря України від 01.12.1999 р., № 46). – Режим доступу : <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0046588-99#Text>.

19. Методические подходы установления размеров санитарно-защитных зон для объектов портов при перегрузках пылящих навалочных и насыпных грузов / С.Н. Козулько, Е.П. Белобров, В.В. Бабиенко, Л.В. Басалаева, М.С. Замбриборщ, И.Г. Лисовой, В.И. Бескровный, А.И. Нечипоренко, Е.А. Потапов // Медицина транспорта – 2015 : сб. материал. III Межд. конгрес. (15-17 сентября 2015 г.; Одесса). – Одесса : УкрНИИ медицины транспорта, 2015. – С. 112-114.
20. Современные методы измерения концентраций аэрозоля витающей пыли лазерными счетчиками на объектах производства и транспорта / С.М. Контуш, Е.П. Белобров, Л.М. Шафран, С.В. Мямлин, С.А. Щекатолина, А.Н. Бойченко, С.Г. Сидоренко, М.С. Замбриборщ, В.Г. Вечеровский, В.В. Бабиенко // Медицина транспорта – 2015 : сб. материал. III Межд. конгресс. (15-17 сентября 2015 г.; Одесса). – Одесса : УкрНИИ медицины транспорта, 2015. – С. 114-116.
21. Збірник показників емісії (питомих викидів) забруднюючих речовин в атмосферне повітря різними виробництвами. Том I. – Донецьк : Український науковий центр технічної екології, 2004. – 184 с. – Режим доступу : https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/normdocs/tom_1.pdf.
22. Пономаренко Т.М. Характеристика джерел утворення та розрахунок викидів забруднюючих речовин у процесах пересипання на кар'єрах / Т.М. Пономаренко, Г.М. Вовкодав // Збалансоване природокористування. – 2019. – № 1. – С. 92-100. – Режим доступу: <https://doi.org/10.33730/2310-4678.1.2019.170596>.
23. Методическое пособие по расчету выбросов от неорганизованных источников в промышленности строительных материалов. – Новороссийск : ЗАО «НИПИОТСТРОМ», 2000. – 27 с. – Режим доступу : http://www.tehlit.ru/1lib_norma_doc/54/54301/index.htm.
24. Сборник методик по расчету выбросов в атмосферу загрязняющих веществ различными производствами. – Ленинград : Гидрометеиздат, 1986. – 104 с. – Режим доступу : <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293728/4293728226.pdf>.
25. Звіт з оцінки впливу на довкілля залізничного вагового комплексу на коліях №№ 1, 1а нижнього майданчику вантажно-розвантажувального району (ВРР-2) Державного підприємства «Морський торговельний порт «Южний» за адресою : Одеська обл., м. Южне, вул. Берегова, 13. – 2019 р. – Режим доступу : <http://www.eia.menr.gov.ua/uploads/documents/1638/reports/87f7a8d4b9c3a6b7e7c1ee83831f1ee0.pdf>.
26. ДСТУ 7146:2010. Вугілля кам'яне та антрацит для побутових потреб. Технічні умови. – К. : Держспоживстандарт України. – 2010. – 10 с. – Режим доступу : http://ksv.do.am/GOST/DSTY_ALL/DSTY1/dsty_7146-2010.pdf.
27. Вітри України [Електронний ресурс]. – Режим доступу : https://uk.wikipedia.org/wiki/Вітри_України.
28. Средняя скорость ветра на метеостанциях Донецкой области [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://energywind.ru/recomendacii/skorost-vetra-v-ukraine-i-crimea/Skorost-vetra-Donetskaya-oblast>.

References:

1. Berdina M.Yu., Torosian E.K. Morskoy transport v sisteme mezhdunarodnyih biznes-operatsiy [Sea transport in the system of international business operations]. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya – Modern problems of science and education*, 2015, no. 1 (part 1). Available at: www.science-education.ru/ru/article/view?id=17841 (accessed 15 March 2021). (Rus.)
2. *Administratsiia morskikh portiv Ukrainy : Za operatyvnymy danymy u 2020 r. morski porty Ukrainy obroblyly 158,86 mln. t vantazhiv* (Administration of seaports of Ukraine: According to operational data in 2020, seaports of Ukraine processed 158.86 million tons of cargo) Available at: <http://www.uspa.gov.ua/pres-tsentr/novini/novini-ampu/18191-za-operativnimi-danimi-u-2020-r-morski-porti-ukrajini-obrobili-158-86-mln-t-vantazhiv> (accessed 05 April 2021). (Ukr.)
3. *Mariupolskyi morskyyi torhovelyniy port. Derzhavne pidpriemstvo : U Mariupolskomu portu pidbyly pidsumky roboty za 2020 rik* (Mariupol sea trade port. State-owned enterprise: In the port of Mariupol summed up the work for 2020) Available at: <https://marport.net/uk/allcategories-uk-ua/14-novyny/520-u-mariupolskomu-portu-pidbili-pidsumki-roboti-za-2020-rik> (accessed 15 March 2021). (Ukr.)
4. Vepritskiy R.S., EytutIs G.D., Artem'eva S.V. Analiz ta otsinka obsiahiv tranzytnykh perevezen

- zaliznychnym transportom Ukrainy [Analysis and assessment of the volume of transit traffic by rail in Ukraine]. *Visnyk ekonomiky transportu i promyslovosti – Bulletin of Transport Economics and Industry*, 2018, no. 62, pp. 53-63. doi: [10.18664/338.47:338.45.v0i62.133981](https://doi.org/10.18664/338.47:338.45.v0i62.133981). (Ukr.)
5. Shepelina P.V. Ustroystvo sistemyi pyilepodavleniya v konstruktsiyah gruzopod'emnyih mashin ugolnyih terminalov. *Sb. nauch. tr. po mater. XX mezhd. nauch.-pr. konf. «Nauchnyie tendentsii : Voprosyi tochnyih i tehnycheskih nauk»* [The design of a dust suppression system in the structures of hoisting machines of coal terminals. Collection of sci. works, according to the mater. of XX Int. sci.-pr. conf. «Scientific trends: Issues of exact and technical sciences»]. Saint Petersburg, 2018. Pp. 27-31. doi: [10.18411/spc-12-12-2018-10](https://doi.org/10.18411/spc-12-12-2018-10). (Rus.)
 6. Statistical Review of World Energy. 2020. 68 p. Available at: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2020-full-report.pdf> (accessed 01 May 2021).
 7. *Dobyicha uglya po stranam mira* (Coal mining by countries of the World) Available at: <https://sites.google.com/site/ruregdatav1/ugol-dobyicha> (accessed 10 February 2021). (Rus.)
 8. Zolotareva D.S. Analiz rossiyskogo ryinka uglya [Analysis of the Russian coal market]. *Aktualnyie voprosyi otraslevyih ryinkov i mezhdunarodnoy kommertsii: Elektronnyiy nauchnyiy studentcheskiy zhurnal – Topical issues of industry markets and international commerce: Electronic scientific student journal*. Available at: <https://tiec.mgimo.ru/2020/2020-03/analysis-of-russian-coal-market> (accessed 20 March 2021). (Rus.)
 9. Ulyanin Yu.A., Haritonov V.V., Yurshina D.Yu. Prognozirovanie dinamiki ischerpaniya traditsionnyih energeticheskikh resursov [Forecasting the dynamics of traditional energy resources depletion]. *Problemy prognozirovaniya – Forecasting problems*, 2018, no. 2, pp. 60-71. (Rus.)
 10. Timchenko N.P., Fialko N.M. Analiz mirovyih zapasov energeticheskikh resursov [Analysis of the World's energy reserves]. *Internauka – InterScience*, 2020, no. 18. doi: [10.25313/2520-2057-2020-18-6549](https://doi.org/10.25313/2520-2057-2020-18-6549). (Rus.)
 11. *Natsionalnyi instytut stratehichnykh doslidzhen : Vuhilna promyslovist Ukrainy v umovakh hibrydnoi viiny : Analitichna zapyska* (National Institute for Strategic Studies: Coal Industry of Ukraine in a Hybrid War: Analytical Note) Available at: <https://niss.gov.ua/doslidzhennya/nacionalna-bezpeka/vuhilna-promislovist-ukraini-v-umovakh-gibridnoi-viyni-analitichna> (accessed 05 April 2021). (Ukr.)
 12. *Innovatsionnyie tehnologii : Morskoy port* (Innovative technologies: Seaport) Available at: <https://www.tumantorg.ru/uslugi/pylepodavlenie/morskoj-port.html> (accessed 20 April 2021) (Rus.)
 13. *Entsiklopediya gornogo dela : Oroshenie* (Encyclopedia of Mining: Irrigation) Available at: <https://maxi-exkavator.ru/articles/encyclopedia/~id=1721> (accessed 13 March 2021) (Rus.)
 14. Muzlova G.I. Pyilyaschiy vopros : stanet li ekologicheskii faktor chastyu ekonomiki perevalki navalochnyih gruzov v morskiih portah? [A dusty question: will the environmental factor become a part of the economy of bulk cargo handling in seaports?]. *Morskie porty – Seaports*, 2014, no. 4, pp. 26-29. Available at: <http://www.morvesti.ru/analitika/1692/31749> (accessed 15 December 2020). (Rus.)
 15. NPAOP 10.0-1.01-05. Pravila bezpeki u vugilnih shahtah [Legal Regulations on Occupation Safety 10.0-1.01-05. Safety rules in coal mines]. Kiev, 2004. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0327-05#Text> (accessed 03 December 2020). (Ukr.)
 16. *Osnovnyie sredstva : Eh, dorogi, pyil da tuman. (Chast 1). Sovremennyye tehnologii i oborudovanie dlya podavleniya pyili* (Fixed assets: Oh, roads, dust and fog. (Part 1). Modern technologies and equipment for dust suppression) Available at: <https://os1.ru/article/4316-sovremennyye-tehnologii-i-oborudovanie-dlya-podavleniya-pyli-eh-dorogi-pyl-da-tuman-ch-1> (accessed 23 February 2021). (Rus.)
 17. DSP 173-96. *Derzhavni sanitarni pravyla planuvannia ta zabudovy naselenykh punktiv* (State sanitary rules 173-96. State sanitary rules for planning and building of settlements). Kiev, 1996. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0379-96#Text> (accessed 20 March 2021).
 18. *DSanPiN 7.7.4.-046-99. Derzhavni sanitarni pravyla i normy dlia morskyykh ta richkovyykh portiv* (State sanitary rules and norms 7.7.4.-046-99. State sanitary rules and norms for sea and river ports). Kiev, 1999. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0046588-99#Text> (accessed 20 March 2021). (Ukr.)

19. Kozulko S.N., Belobrov E.P., Babienko V.V., Basalaeva L.V., Zambriborsch M.S., Lisovoy I.G., Beskrovnyiy V.I., Nechiporenko A.I., Potapov E.A. Metodicheskie podhodyi ustanovleniya razmerov sanitarno-zaschitnyih zon dlya ob'ektov portov pri peregruzkah pyilyaschih navalochnyih i nasyipnyih gruzov. *Sb. material. III Mezhd. kongres. «Meditsina transporta – 2015»* [Methodological approaches for establishing the size of sanitary protection zones for port facilities during transshipment of dusty bulk and dry bulk cargo. III Int. congress materials collection «Medicine of transport – 2015»]. Odessa, 2015, pp. 112-114. (Rus.)
20. Kontush S.M., Belobrov E.P., Shafran L.M., Myamlin S.V., Schekatolina S.A., Boychenko A.N., Sidorenko S.G., Zambriborsch M.S., Veчерovskiy V.G., Babienko V.V. Sovremennyye metody izmereniya kontsentratsiy aerolya vitayuschey pyili lazernymi schetchikami na ob'ektah proizvodstva i transporta. *Sb. material. III Mezhd. kongres. «Meditsina transporta – 2015»* [Modern methods of measuring the concentration of aerosol of floating dust with laser counters at production and transport facilities. III Int. congress materials collection «Medicine of transport – 2015»]. Odessa, 2015, pp. 114-116. (Rus.)
21. *Zbirnyk pokaznykiv emisii (pytomykh vykydiv) zabrudniuiuchykh rehovyn v atmosferne povitria riznymy vyrobnystvamy. Tom I.* [Collection of indicators of emissions (specific emissions) of pollutants into the atmosphere by various industries. Vol. I.]. Donetsk, Ukrainskyi naukovyi tsentr tekhnichnoi ekolohii Publ., 2004. 184 p. Available at: https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/normdocs/tom_1.pdf (accessed 15 November 2020). (Ukr.)
22. Ponomarenko T.M., Vovkodav H.M. Kharakterystyka dzhherel utvorennia ta rozrakhunok vykydiv zabrudniuiuchykh rehovyn u protsesakh peresypannia na karierakh [Characteristics of sources of formation and calculation of emissions of pollutants in the processes of pouring on quarries]. *Zbalansovane pryrodokorystuvannia – Balanced nature management*, 2019, no. 1, pp. 92-100. doi: 10.33730/2310-4678.1.2019.170596. (Ukr.)
23. *Metodicheskoe posobie po raschetu vyibrosov ot neorganizovannyih istochnikov v promyishlennosti stroitelnyih materialov* [Methodical manual for calculating emissions from unorganized sources in the construction materials industry]. Novorossiysk : ZAO «NIPIOTSTROM» Publ., 2000. 27 p. Available at: http://www.tehlit.ru/1lib_norma_doc/54/54301/index.htm (accessed 13 February 2021). (Rus.)
24. *Sbornik metodik po raschetu vyibrosov v atmosferu zagryaznyayuschih veschestv razlichnyimi proizvodstvami* [Collection of methods for calculating emissions of pollutants into the atmosphere by various industries]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1986. 104 p. (Rus.)
25. *Zvit z otsinky vplyvu na dokillia zaliznychnoho vahovoho kompleksu na kolyiakh №№ 1, 1a nyzhnogo maidanchyku vantazhno-rozvantazhuvalnoho raionu (VRR-2) Derzhavnoho pidprijemstva «Morskyi torhovelnyi port «Iuzhnyi» za adresoiu : Odeska obl., m. Yuzhne, vul. Berehova, 13* (Environmental impact assessment report of the railway weighing complex on the tracks №№ 1, 1a of the lower platform of the loading and unloading area (LUA-2) of the State Enterprise «Sea Commercial Port «Yuzhny» at the address: Odessa region, Yuzhne, st. Berehova, 13) Available at: <http://www.eia.menr.gov.ua/uploads/documents/1638/reports/87f7a8d4b9c3a6b7e7c1ee83831f1ee0.pdf> (accessed 01 March 2021). (Ukr.)
26. *DSTU 7146:2010. Vuhillia kamiane ta antratsyt dlia pobutovykh potreb. Tekhnichni umovy* [State Standart 7146:2010. Coal and anthracite for household use. Specifications]. Kiev, Derzhspozhyvstandart Ukrainy Publ., 2010. 10 p. Available at: http://ksv.do.am/GOST/DSTY_ALL/DSTY1/dsty_7146-2010.pdf (accessed 01 April 2021). (Ukr.)
27. *Vitry Ukrainy* (Winds of Ukraine) Available at: https://uk.wikipedia.org/wiki/Вітри_України. (accessed 05 April 2021) (Ukr.)
28. *Srednyaya skorost vetra na meteostantsiyah Donetskoy oblasti* (Average wind speed at meteorological stations of Donetsk region) Available at: <http://energywind.ru/recomendacii/skorost-vetra-v-ukraine-i-crimea/Skorost-vetra-Donetskaya-oblast> (accessed 05 April 2021). (Rus.)

Рецензент: А.В. Кальянов
д-р мед. наук, проф., ДВНЗ «ПДТУ»

Стаття надійшла 29.04.2021

ЦИВІЛЬНА БЕЗПЕКА

УДК 622.235

doi: 10.31498/2225-6733.42.2021.240683

© Савельєв Д.В.¹, Столбченко О.В.², Юрченко А.А.³, Грунтовой Д.Р.⁴**ЗНИЖЕННЯ УТВОРЕННЯ ПИЛУ ПРИ ВИБУХОВИХ РОБОТАХ
В ПІДЗЕМНИХ ГІРНИЧИХ ВИРОБКАХ**

У статті розглянуто спосіб зниження концентрації дрібнодисперсного пилу в туніковій підземній гірничій виробці при її проведенні буро-підривним способом. Розроблено конструкцію заряду з використанням пластичної суміші в якості набійки, яка розширюється і твердіє, що забезпечує перерозподіл енергії вибуху по всій колонці заряду і зниження питомого імпульсу в зоні інтенсивного подрібнення породи за рахунок затримки продуктів детонації в шпурі до початку руйнування гірського масиву. Це забезпечує зниження утворення дрібнодисперсного пилу при підриві заряду вибухівки в середньому в 6 разів.

Ключові слова: вибухові роботи, дрібнодисперсний пил, концентрація, зниження, твердюча набійка.

D.V. Saveliev, O.V. Stolbchenko, A.A. Yurchenko, D.R. Hruntovoi. Reduction of dust formation at blasting works in underground mining products. The paper considers the issue of increasing the efficiency of air dedusting during underground working by drilling and blasting by the use of packing that hardens due to the delay of detonation products in the borehole before the destruction of the mountain rock and the rock movement. Analytical and experimental methods were used to study the processes of formation, removal and distribution of dust during blasting. Mathematical modelling methods were used to develop a model for changing the concentration of impurities during the movement of highly dispersed systems under conditions of ventilation of dead-end mine workings carried out by drilling and blasting. Analytical methods substantiate the rational parameters of drilling and blasting operations with employing a new method of reducing air dust. Methods of mathematical statistics are also used in the processing of experimental results and evaluation of the reliability of the obtained mathematical models. As a result of the carried-out researches the methods and means that make it possible to increase efficiency of dedusting air at mine workings by drilling and blasting have been developed and proved. The scientific novelty of the research is a substantiated and refined regularity of fine dust formation at blowing up borehole charges in a dead-end underground mining. The practical value of the work consists in developing the design of the borehole charge using a plastic mixture as a packing, which expands and hardens, thus delaying the explosive products detonation in the borehole up to the destruction of the rock and rock movement. This results in a redistribution of the explosion energy throughout the charge column and in the reduction of the specific impulse in the zone of intensive grinding of the rock thus reducing the formation of fine dust. According to the results of industrial research, it has been found

¹ канд. техн. наук, доцент, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, ORCID: 0000-0002-0738-3273, barm1907@gmail.com

² канд. техн. наук, доцент, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, ORCID: 0000-0003-2003-4382, elena_aot@ukr.net

³ канд. техн. наук, доцент, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, ORCID: 0000-0002-6074-0145, anneta2904@ukr.net

⁴ студент, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, hruntovoi.d.r@nmu.one

out that the use of the developed packing made it possible to reduce the concentration of fine dust in the mining atmosphere after blasting by an average of six times.

Keywords: *blasting works, fine dust, concentration, decrease, hardening packing.*

Постановка проблеми. Сучасна технологія проведення гірничих виробок базується на широкому застосуванні буро-підривних робіт. На шахтах Донбасу цим способом проводиться близько 70% всіх основних і нарізних виробок [1]. Проведення гірничих виробок по міцних породах буро-підривним способом супроводжуються викидом в гірничу атмосферу пилу і шкідливих газів, вносячи істотний внесок в погіршення санітарно-гігієнічних умов праці гірників.

Одним з головних недоліків цього способу є утворення значної кількості дрібнодисперсного пилу з розмірами часток 0,5...5 мкм. Під час проведення підривних робіт в умовах міцних порід в атмосферу надходить близько 0,5 кг дрібнодисперсного пилу на 1 м³ відбитої гірничої маси і близько 1000 л шкідливих газових домішок при підриванні 1 кг вибухової речовини (ВР). Такий обсяг забруднень, що утворюється при одночасному підриванні великих кількостей ВР, не дозволяє існуючими засобами вентиляції знизити концентрацію пилу до гранично допустимих значень на протязі тривалого періоду провітрювання після вибуху. Концентрації, а також винесення і поширення пило-газових домішок, залежать від параметрів вибуху, петрографічного складу гірського масиву і умов провітрювання підготовчої тупикової виробки. Тому для поліпшення санітарно-гігієнічних умов праці на основі підвищення ефективності знепилювання повітря при проведенні гірничих виробок буро-підривним способом важливо виявити взаємний зв'язок між зазначеними факторами. Для цього необхідно виконати дослідження процесів утворення і поширення пило-газових домішок і впливу їх на санітарно-гігієнічні умови праці гірників у виробках і розробити засоби зниження концентрації дрібнодисперсного пилу після підриву шпурових зарядів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відомо, що одним з основних чинників, які визначають вихід пилу при руйнуванні порід вибухом, є кількість заряду ВР [2-4], яка знаходиться в прямій залежності від ефективності вибуху шпурових зарядів і визначається, в свою чергу, конструкцією і складом внутрішньої набійки шпурів. Для підвищення якості набійки шпурових зарядів за рахунок поліпшення її фізико-механічних характеристик виконані дослідження по розробці раціонального складу пружно-пластичної суміші, яка розширюється при твердінні і основними компонентами якої була обрана піщано-глиниста суміш з співвідношенням компонентів 1:3 і вода.

Практично увесь пил, що утворився, разом зі зруйнованою гірською масою відкидається на відстань 5-10 м від забою. Частина пилу підхоплюється вибуховою хвилею і несеться на 50-70 м, частково відкладається на ґрунті, боках і покрівлі виробки. Середня запиленість повітря протягом трьох хвилин після вибуху становить 400-7300 мг/м³. Причому, в перші 3-4 с концентрація зваженого пилу може досягати 12000 мг/м³.

Як показують дослідження, в легенях при антракозі і силікозі знаходиться приблизно 95% частинок пилу розміром менше 2 мкм, до 5% – 2...4 мкм і незначна кількість – понад 5 мкм. Оцінка чистоти рудникової атмосфери в вугільних шахтах після вибухових робіт здійснюється за гранично допустимими концентраціями (ГДК), тобто за такими концентраціями шкідливих домішок, які ще не надають негативної дії на людину, не знижують її працездатності. У комплексі з пилом, який утворюється при буро-підривних роботах, забруднена атмосфера є серйозною небезпекою загального отруєння організму і сприяє захворюванню гірників на пневмоконіоз. Це пояснюється тим, що пил є досить активним сорбентом, отруйні гази десорбують з нього тривалий час і комплексно впливають на живий організм [4, 5].

Найбільш шкідливим компонентом вугільно-породного пилу є вільний і пов'язаний двоокис кремнію. Проведеними Макіївським науково-дослідним інститутом дослідженнями вмісту двоокису кремнію в пилу шахт Донбасу встановлено, що середній відносний вміст загального двоокису кремнію в вугільно-породному пилу становить 38-47%, а вміст вільного двоокису кремнію – 3,0-5,5%. Патогенна дія визначається головним чином його масою, речовим складом і дисперсністю [6].

Наслідком вибуху є утворення великої кількості дрібнодисперсного пилу. Запиленість 1 м³ повітря протягом 15-20 хв після вибуху, якщо не застосовувати засобів знепилювання, ста-

новить 400-1000 мг, при цьому до 90-97% частинок цього пилу мають діаметр менше 5 мкм. Цей пил вважається таким, який важко пригнічується і є найбільш небезпечним для людини, а адсорбція на його поверхні отруйних газів підвищує агресивність цього пилу і сприяє швидкому розвитку у працюючих в шахтах профзахворювань, в тому числі пов'язаних з органами дихання – пневмоконіозу, хронічного пилового бронхіту та інших захворювань [7].

Важливим фактором, який визначає умови і ефективність вибуху шпурових зарядів, являється внутрішня набійка. Її величина і якість в значній мірі визначають ступінь використання енергії вибуху для руйнування гірського масиву, рівномірність його подрібнення, а також об'єм утвореного пилу. Численні дослідження різних конструкцій набійки та застосованих матеріалів дозволили зробити висновок, що шляхом покращення якості набійки можна приблизно в три рази збільшити час дії вибуху на руйнуючий гірський масив (замикаючий ефект) та в значній мірі знизити максимальну швидкість вильоту продуктів вибуху із гирла шпурів, і тим знизити об'єм утвореного дрібнодисперсного пилу [8].

Мета дослідження. Підвищення ефективності знепилювання повітря від дрібнодисперсних фракцій (з розміром часток менше 5 мкм), які утворюються в повітрі рудникової атмосфери під час вибуху, шляхом удосконалення набійки шпурових зарядів при проведенні вибухових робіт в підготовчих виробках.

Виклад основного матеріалу. Енергія вибуху може бути використана найбільш повно тільки в тому разі, коли набійка забезпечує затримку продуктів детонації в шпурі до початку руйнування гірського масиву і переміщення порід. Тому якість набійки повинна бути такою, щоб сумарний опір тертя по поверхні здвигу рівнявся виштовхувальному зусиллю продуктів детонації:

$$\sum Q_{mp} = S,$$

де $\sum Q_{mp}$ – сумарний опір сил тертя по поверхні здвигу набійки, Н; S – виштовхувальне зусилля продуктів детонації, Н.

Пошук і обґрунтування оптимального співвідношення компонентів, які входять до складу суміші набійки, проводився з використанням лінійної моделі планування експериментів при пошуку оптимальних умов [9]. Для обґрунтування оптимального співвідношення компонентів піщано-глинистої суміші і води в складі набійки і виду добавок, що вводяться, а також процентного співвідношення їх до загальної маси готового матеріалу набійки необхідно було встановити вплив цих співвідношень на якість суміші. З цією метою до піщано-глинистої суміші додавали: 18,5% доломітового пилу фракції 0,2 мм; 13,5% лігносульфонатів; 4,5% алюмокалієвих квасців ($Kal(SO_4)_2 \cdot 10H_2O$) і до 100% доповнювали цю суміш водою. Після затвердіння суміші визначалася її густина відповідно до чинних норм [10].

Оптимізацію складу набійки проводили зі зміни густини суміші шляхом введення різних співвідношень добавок до суміші: доломітового пилу фракції 0,2 мм від 17 до 20% і лігносульфонатів вологістю 12-15%. Зміни густини набійки при різних співвідношеннях добавок в суміші приведені в табл. 1.

Таблиця 1

Зміни густини набійки при різних співвідношеннях добавок

Тип добавок	Вміст добавок в суміші, %		
	17,0	18,5	20,0
Доломітовий пил	17,0	18,5	20,0
Лігносульфонати	12,0	13,5	15,0
Величина густини $\rho \cdot 10^3$, кг/м ³	2,10-2,13	2,15-2,17	1,93-2,00

Як видно з таблиці, зі збільшенням співвідношення добавок, що вводяться в суміш, щільність затверділої маси зменшується. Це пояснюється тим, що при збільшенні співвідношення добавок, що вводяться до загальної маси суміші, збільшується її пористість через збільшення площі нової поверхні, що веде, в свою чергу, до зменшення густини упаковки зерен, погіршення якості матеріалу набійки і збільшення фільтраційних властивостей суміші.

За результатами експериментальних досліджень була розроблена технологія виготовлення твердої суміші, в якій в якості в'язучого компонента, що заповнює простір між частками піщано-глинистої суміші, використовується доломітовий пил фракції 0,2 мм і вологістю 13-15%. Водний розчин лігносульфонатів дозволяє сформувати стабільну суміш високої густини, пластичності і рухливості при її транспортуванні, а алюмокалієві галуни – високу міцність при її твердінні. Отже, в результаті змішування наведених компонентів при оптимальному їх співвідношенні в суміші формується склад зі стійкими деформаційними і фізико-механічними характеристиками. Оскільки в поставленому завданні необхідно було створити набійки, які здатні розширюватися при твердінні, були випробувані для цих цілей лігносульфонати (солі лігносульфонових кислот), які досить дешеві і є відходами сульфітного способу отримання целюлози. Товарна назва цього продукту – «концентрати сульфітів-дріжджової бражки – КБТ, КБЖ».

Після підбору всіх компонентів, що входять до складу пропонованого матеріалу набійки, необхідно встановити раціональне їх співвідношення, для чого використовувалася лінійна модель планування експерименту, заснована на варіюванні чинників за трьома рівнями [9].

В якості факторів, прийнятих в дослідженнях з обґрунтування оптимальних співвідношень компонентів у суміші, є процентний вміст доломітового пилу фракції (0,2 мм), води і лігносульфонатів, які змінюються за трьома рівнями: -1; 0; +1 – при мінімальних, оптимальних і максимальних значеннях. Результати розрахунків співвідношення основних компонентів набійки наведено в табл. 2, 3.

Таблиця 2

Рівні факторів та інтервали варіювання

Фактор	Кодова позначка	Рівні		
		-1	0	+1
Зміст доломітового пилу фракції d = 0-0,2 мм в суміші, мас. %	X1	17,0	18,5	20,0
Зміст лігносульфонатів в суміші, мас. %	X2	12,0	13,5	15,0
Зміст рідини в суміші, в мас. %	X3	18,0	19,0	20,0

Таблиця 3

Значення співвідношень компонентів в суміші, в мас.%, при повному факторному експерименті

№№ досліду	Код	Рівні	Зміст доломітового пилу фракції d = 0-0,2 мм в суміші, %	Код	Рівні	Зміст лігносульфонатів в суміші, мас. %	Код	Рівні	Зміст рідини в суміші, в мас. %
1	X1	-1	17,0	X2	-1	12,0	X3	+1	20,0
2		+1	20,0		-1	12,0		-1	18,0
3		-1	17,0		+1	15,0		-1	18,0
4		+1	20,0		+1	15,0		+1	20,0
5		-1	17,0		-1	12,0		-1	18,0
6		+1	20,0		-1	12,0		+1	20,0
7		-1	17,0		+1	15,0		+1	20,0
8		+1	20,0		+1	15,0		-1	18,0
9		-	18,5		-	13,5		-	19,0

На підставі табл. 2 і 3 було підготовлено 9 сумішей і проведений порівняльний аналіз за критерієм «максимальне розширення при твердінні і мінімальний час початку схоплювання суміші». За результатами проведених досліджень отримано раціональне співвідношення компонентів, що входять до складу твердої суміші, що містить піщано-глинисту суміш, доломітовий пил, лігносульфонати, алюмокалієві галуни і воду при наступному співвідношенні, в мас. %: піщано-глиниста суміш – 50-45; доломітовий пил фракції d = 0,2 мм вологістю 13-15% – 17-20;

лігносульфонати – 12-15; алюмокалієві галуни ($Kal(SO_4)_2 \cdot 10H_2O$) – 6-3 і вода – 18-20.

За результатами повного факторного експерименту обґрунтовано раціональне співвідношення компонентів розроблених сумішей і визначені їх фізико-механічні характеристики: щільність ρ , швидкість поздовжніх хвиль C_p і міцність на одноосьовий стиск і інші показники відповідно до чинних норм, які наведені в табл. 4.

Таблиця 4

Фізико-механічні характеристики розробленого складу суміші для набійки шпурів

Найменування показників	Одиниця виміру	Значення показників
Густина, ρ	кг/м ³	2150,0
Коефіцієнт внутрішнього тертя, $K_{вн}$	-	0,53
Зчеплення, C	МПа	,035
Коефіцієнт Пуассона, ν	-	0,35
Модуль Юнга, $E \cdot 10^3$,	МПа	2,34
Міцність суміші на одновісне стиснення P ,	МПа	10-15
Тиск набухання на контакт «Суміш–поверхня шпуру»	МПа	5-10

Застосування розробленого складу набійки із заданими характеристиками забезпечує перерозподіл енергії вибухівки по всій колонці заряду і зниження питомого імпульсу в ближній зоні вибуху. Саме в цій зоні відбувається інтенсивне подрібнення породи з утворенням великої кількості дрібнодисперсного пилу, який потрапляє в рудникову атмосферу.

Параметри провітрювання виробок (табл. 5) були розраховані відповідно до «Керівництва з проектування...» [11] і вимог «Правил безпеки у вугільних шахтах» [12].

Таблиця 5

Характеристика проведених виробок

Характеристики	Значення
Масив, який руйнується	Пісковики
Спосіб проведення виробки	Буро-підрильний
Площа перерізу виробки, м ² :	
- в проходці	11,2
- в світлі	9,0
Тип кріплення	СВП-27
Довжина виробки, м	400
Тип ВР	ПЖВ-20
Витрата ВР за цикл, кг	35
Способи боротьби з пилом	Гідрознепилення; буріння з промиванням; зрошення призабойної зони; водоповітряні завіси

Для перевірки ефективності розроблених способів і засобів зниження виходу дрібнодисперсного пилу при руйнуванні гірських порід енергією вибуху і адекватності математичної моделі, яка встановлює зв'язок між параметрами, які впливають на зміну концентрації дрібнодисперсного пилу по довжині виробки при її провітрюванні, були проведені порівняльні випробування в гірничих виробках на шахті «Покровська». Для проведення досліджень були обрані гірничі виробки, які проводяться по піщаниках із застосуванням буро-підрильних робіт.

Методика виконання роботи полягала в наступному. Перед проведенням вибухових робіт у виробці (рис. 1) визначалися фактичні аеродинамічні параметри (табл. 6): швидкість руху вентиляційного струменя на виході з трубопроводу (v_1) і витрата (Q_1), на відстані 100 м від забою

(v_2 , Q_2). Заміри аеродинамічних параметрів і концентрацій пилу проводилися співробітниками шахти і ДВГРС під методичним керівництвом автора роботи.

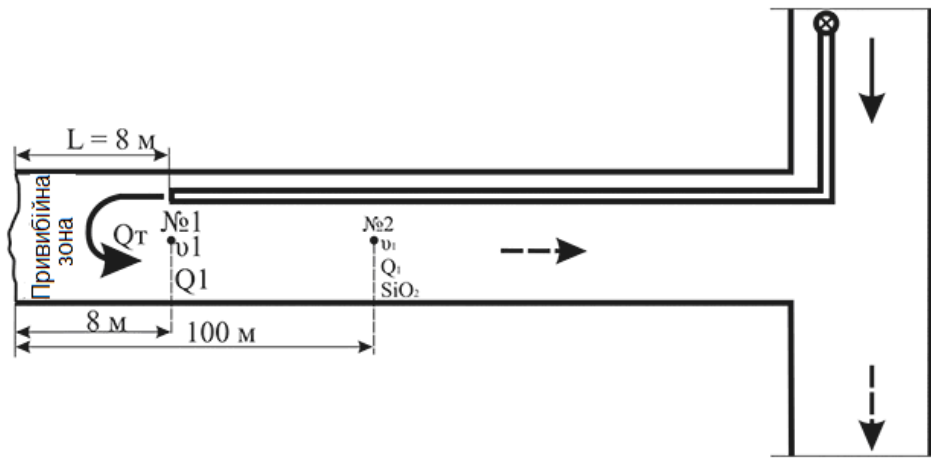


Рис. 1 – Схема розташування вимірювальних пунктів за нагнітальною схемою провітрювання: L – відстань від забою до вентиляційного трубопроводу; Q_T – витрата повітря на виході з труби; №1, №2 – вимірювальні пункти; Q_1 , Q_2 – витрата повітря в перетинах №1, №2 відповідно

Таблиця 6

Параметри провітрювання виробки

Показники	Значення
Тип вентилятора місцевого провітрювання	СВМ-6
Спосіб провітрювання	Нагнітальний
Кількість повітря, м ³ /с:	
- подається в виробку	3,4
- подається в призабойну зону	2,25
- виток повітря з трубопроводу	1,15
Швидкість повітря в призабойній зоні, м/с	0,25

Результати досліджень динаміки пилової хмари після вибуху наведено на рис. 2.

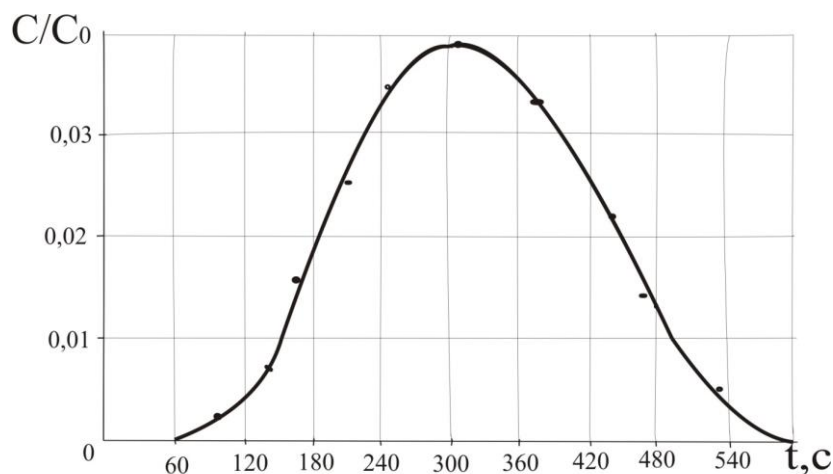


Рис. 2 – Графік, що характеризує динаміку концентрації дрібнодисперсного пилу в пило-газовій хмарі в залежності від часу після висадження на відстані 100 м від призабойної зони

Для визначення зміни концентрації пилу по довжині гірничої виробки заміри швидкості повітря і концентрації пилу проводилися в 10 точках через кожні 25 м виробки. З метою перевірки ефективності розроблених способів і засобів зниження концентрації пилу в рудниковій атмосфері за рахунок зменшення виходу дрібнодисперсного пилу при руйнуванні гірських порід енергією вибуху за допомогою зменшення міцності середовища на контакті «ВР-порода», а також розробленого складу набійки, яка розширюється, були проведені експериментальні вибухи з використанням вищевказаних способів і засобів. Результати вимірів наведені на рис. 3. Із рисунка видно, що концентрація пилу в другому експерименті (крива 2) знизилася в середньому в 6 разів. Зменшення концентрації пилу відбувається за рахунок застосування при підриванні зарядів вибухівки з набійкою розробленого складу.

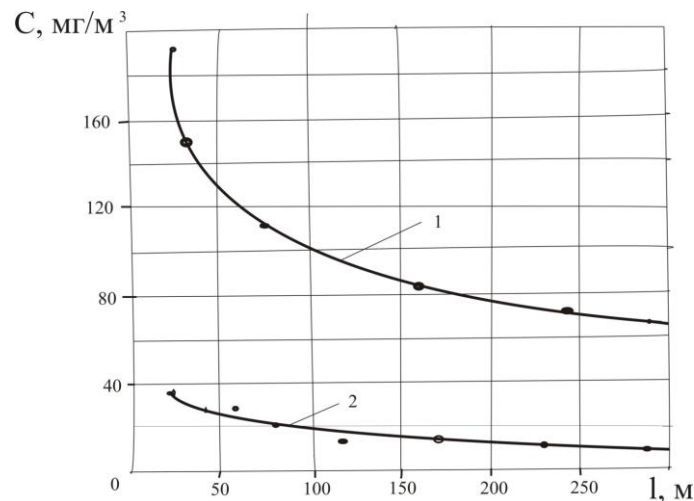


Рис. 3 – Динаміка концентрації дрібнодисперсного пилу в хмарі по довжині виробки: 1 – експериментальна крива при традиційному складу набійки; 2 – динаміка концентрації пилу із застосуванням засобів зменшення виходу дрібнодисперсного пилу

Таким чином, виконані порівняльні експериментальні дослідження свідчать про те, що при використанні набійки, яка розширюється в шпурах при проведенні виробок буропідривним способом, дисперсний склад пилу істотно змінюється, тобто відбувається зниження запиленості в середньому до шести разів за рахунок зменшення кількості дрібнодисперсної фракції до 10 мкм.

Висновки

1. Розроблено склад суміші для набійки шпурових зарядів, яка розширюється при затвердінні. Основним компонентом суміші є піщано-глиниста суміш з додаванням в'язучих добавок – алюмокалієві галуни і лігносульфонати + доломітовий пил – відходи деревообробної та гірничорудної промисловості. Розроблено методику визначення оптимальних складів, властивостей твердуючої суміші і технології її приготування.

2. Експериментально встановлено, що застосовувана при підриванні зарядів вибухівки набійка з твердуючою сумішшю збільшує час перебування її в шпурі в порівнянні з іншими конструкціями зарядів, створюючи надійне замикання продуктів детонації. При цьому в значній мірі підвищується ступінь використання енергії вибуху для руйнування гірського масиву, рівномірність його дроблення, а обсяг викидання в гірничу атмосферу дрібнодисперсного пилу знижується в середньому до шести разів.

Перелік використаних джерел:

1. Шевцов Н.Р. Разрушение горных пород взрывом / Н.Р. Шевцов, П.Я. Таранов, В.В. Левит, А.Г. Гудзь. – Донецк : ДонНТУ, 2003. – 253 с.
2. Беззубченкова М.В. Експериментальні дослідження зниження кінцевої концентрації пилу при

- вибухових роботах / М.В. Беззубченкова, А.В. Воробйов, В.В. Воробйов, В.М. Чебенко // Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва. Науково-виробничий журнал. – 2017. – Вип. 1/2017 (19). – С. 25-40.
3. Optimisation of Drill and Blast for Mill Throughput Improvement at Ban Houayxai Mine / J. Gaunt, D. Symonds, G. McNamara, B. Adiyansyah, L. Kennelly, E.J. Sellers, S.S. Kanchibotla // Proceedings of the 11th International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting: The Australasian Institute of Mining and Metallurgy. – Melbourne, 2015. – Pp. 307-314.
 4. Комащенко В.И. Разработка технологии взрывных работ, уменьшающей вредное воздействие на окружающую среду / В.И. Комащенко, Е.Д. Воробьев, В.Г. Лукьянов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – Томск, 2017. – Т. 328. – № 8. – С. 33-40.
 5. Mukherjee A.K. Assessment of respirable dust and its free silica contents in different Indian coalmines / A.K. Mukherjee, S.K. Bhattacharya, H.N. Saiyed // Industrial health. – 2005. – № 43. – Pp. 277-284.
 6. Проблемы экологии массовых взрывов в карьерах / Э.И. Ефремов, П.В. Бересневич, В.П. Мартыненко, В.И. Борисов. – Днепропетровск : Січ, 1996. – 177 с.
 7. Экспериментальные результаты разрушения полиминеральных сред при взрывном и механическом воздействии / Э.И. Ефремов, В.Д. Петренко, И.Л. Кратковский, В.В. Шеленок // Высокоэнергетическая обработка материалов: материалы междуна. конф. – Днепропетровск, 2000. – С. 44-49.
 8. Ефремов Э.И. Роль забойки в запылении газообразных продуктов детонации / Э.И. Ефремов, С.Н. Родак // Повышение эффективности разрушения горных пород. – К. : Наукова думка, 1991. – С. 3-8.
 9. Адлер Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, В.П. Грановский. – М. : Наука, 1976. – 280 с.
 10. ДСТУ Б В.2.7-114-2002. Суміші бетонні. Методи випробувань. – Введ. 2002-01-31. – К. : Укрархбудінформ, 2002. – 25 с.
 11. Руководство по проектированию вентиляции угольных шахт. – К. : Основа, 1994. – 312 с.
 12. НАОП 10.0-1.01-09. Правила безпеки у вугільних шахтах. – К. : Мінвуглепром України, МакНДІ, 2009. – 231 с.

References:

1. Shevtsov N.R., Taranov Ya, Levit V.V., Gudz A.G. *Razrushenie gornykh porod vzryvom* [Destruction of rocks by explosion]. Donetsk, DonNTU Publ., 2003. 253 p. (Rus.)
2. Bezzubchenkova M.V., Vorobiov A.V., Vorobiov V.V., Chebenko V.M. Eksperymentalni doslidzhennia znyzhennia kintsevoi kontsentratsii pylu pry vybukhovyykh robotakh [Experimental studies of reducing the final concentration of dust during blasting]. *Suchasni resursoenerhozberihaiuchi tekhnolohii hirnychoho vyrobnytstva – Modern resource-saving technologies of mining production*, 2017, no. 1/2017 (19), pp. 25-40. (Ukr.)
3. Gaunt J., Symonds D., McNamara G., Adiyansyah B., Kennelly L., Sellers E.J., Kanchibotla S.S. Optimisation of Drill and Blast for Mill Throughput Improvement at Ban Houayxai. *Proceedings of the 11th International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting*. Melbourne, 2015, pp. 307-314.
4. Komashhenko V.I., Vorob'ev E.D., Luk'yanov V.G. Razrabotka tekhnologii vzryvnykh rabot, umen'shayushhej vrednoe vozdeystvie na okruzhayushchuyu sredu [Development of blasting technology that reduces the harmful impact on the environment]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov – Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Engineering of georesources*, 2017, no. 328, pp. 33-40. (Rus.)
5. Mukherjee A.K., Bhattacharya S.K., Saiyed H.N. Assessment of respirable dust and its free silica contents in different Indian coalmines. *Industrial health*, 2005, no. 43, pp. 277-284.
6. Efremov E.I., Beresnevich P.V., Martynenko V.P., Borisov V.I. *Problemy ekologii massovykh vzryvov v kar'erakh* [Ecological problems of massive explosions in quarries]. Dnepropetrovsk, Sich Publ., 1996. 177 p. (Rus.)
7. Efremov E.I., Petrenko V.D., Kratkovskij I.L., Shelenok V.V. Eksperymental'nye rezul'taty razrusheniia polimineral'nykh sred pri vzryvnom i mekhanicheskom vozdeistvii. *Materialy mizhn.*

- konf. «Vysokoenergeticheskaya obrabotka materialov»* [Experimental results of the destruction of polymineral media under explosive and mechanical action. Proceedings of Int. «High Energy Material Processing»]. Dnepropetrovsk, 2000, pp. 44-49. (Rus.)
8. Efremov E.I., Rodak S.N. Rol' zabojki v zapiranii gazoobraznykh produktov detonaczii [The role of stemming in locking off gaseous detonation products]. *Povyshenie effektivnosti razrusheniya gornykh porod – Increasing the efficiency of destruction of rocks*, 1991, pp. 3-8. (Rus.)
 9. Adler Yu.P., Markova E.V., Granovskij V.P. *Planirovanie eksperimenta pri poiske optimal'nykh uslovij* [Planning an experiment to find optimal conditions]. Moscow, Nauka Publ., 1976. 280 p. (Rus.)
 10. DSTU B V.2.7-114-2002. *Sumishi betonni. Metody vyprobuvan* [State Standard V.2.7-114-2002. Concrete mixes. Test methods]. Kyiv, Standartinform Publ., 2002. 25 p. (Ukr.)
 11. *Rukovodstvo po proektirovaniyu ventilyaczii ugol'nykh shakht* [Guidelines for the design of ventilation of coal mines]. Kyiv, Osnova, 1994. 312 p. (Rus.)
 12. NAOP 10.0-1.01-09. *Pravyly bezpeky u vuhilnykh shakhtakh* [State Standard 10.0-1.01-09. Safety rules in coal mines]. Kyiv, Minvuhleprom Ukrainy, MakNDI, 2009. 231 p. (Ukr.)

Рецензент: С.І. Чеберячко
д-р техн. наук, проф., НТУ «ДП»

Стаття надійшла 03.04.2021

УДК 622.817

doi: 10.31498/2225-6733.42.2021.240685

© Когтєва О.П.*

ЛАБОРАТОРНА ПЕРЕВІРКА СПОСОБУ КОНТРОЛЮ ДЕГАЗАЦІЇ ГІРНИЧОГО МАСИВУ

Розглянуто декілька варіантів зниження газової та газодинамічної безпеки при проведенні підготовчих виробок по викидонебезпечному пласту, увага акцентована на запропонованому способі проведення підготовчої виробки, що включає буріння випереджаючих свердловин, гідророзпушування вугільного пласта шляхом нагнітання у нього води та механічне руйнування вугілля й гірських порід. Спосіб відрізняється тим, що при гідророзпушуванні вугільного пласта до води додають пігмент, виконують відсмоктування метану зі свердловини, а механічне руйнування пласта й гірських порід при проведенні виробки виконують у межах простору, обробленого пігментом для наочного оцінювання ситуації. В лабораторних умовах перевірена ефективність способу і можливість реалізації в реальних умовах.

Ключові слова: викидонебезпечний пласт, свердловина, противикидні заходи, буріння, гідророзпушення, пігмент.

O.P. Kohtieva. Laboratory verification of the method of rock degassing control. An increase in the depths of mining operations has become an acute problem of safe and efficient mining works; gas capacity of the developed layers and host rocks increasing. The process is accompanied by increased methane emissions and gas-dynamic effects: emissions of methane, coal and sandstone. The probability of the gas-dynamic effects increases with the increase in the area of roof rocks exposure, at conducting mining works in the zone of increased mountain pressure. Visible cracks form. It has been established that one of the effective ways to control mine methane is early degassing of the boreholes. At present, the methods that would help eliminate emissions while degassing the workspace are little known. It is necessary to make up new approaches to the development and use

* аспірант, ДВНЗ «Донецький національний технічний університет», м. Покровськ, ORCID: 0000-0001-7282-8243, olha.kohtieva@donntu.edu.ua

of the methods of forecasting and protective measures. The relevance of the development and implementation of modern methods and techniques for monitoring the condition of the rock mass is currently central, because the safety of miners is an important task of the coal industry. To improve the safety of miners, it is necessary to develop fast but simple methods, portable devices, etc., that would make it possible to assess and monitor the state of the rock directly. Several options for reducing gas and gas-dynamic safety during preparatory works have been considered; attention being focused on the proposed method of preparatory works, including drilling of advance wells, hydro-loosening of coal seam by injection of water and mechanical destruction of coal. The method is distinguished by the fact that when the coal seam is loosened, pigment is added to the water, methane is sucked out of the well, mechanical destruction of the layer and rocks is performed; and within the space treated with pigment it is possible to assess the situation visually. In laboratory conditions the efficiency of the method and the possibility of its realization in real conditions has been checked.

Keywords: *emission hazard layer, borehole, anti-emission measures, drilling, hydro loosening, pigment.*

Постановка проблеми. Гострою проблема безпечного та ефективного проведення гірничих робіт стала зі збільшенням глибин розробки шахт, бо разом з тим зросла газоносність розроблюваних пластів і вміщуючих порід [1]. Процес супроводжується підвищенням метановиділення та газодинамічними проявами: викид метану, вугілля та пісковиків. Вірогідність виникнення газодинамічного явища підвищується при збільшенні площі оголення порід покрівлі, ведення гірничих робіт в зоні підвищеного гірського тиску. Спостерігається утворення видимих тріщин [2]. Встановлено, що одним з ефективних способів боротьби з шахтним метаном є завчасна дегазація з використанням свердловин. Створення тріщин за рахунок гідророзпушення пласта ініціює виділення метану у вільному та адсорбованому вигляді до свердловини.

На теперішній час маловідомі способи, які б сприяли і усуненню викиднебезпечності, і дегазації робочого простору одночасно. Необхідне створення нових підходів до розробки і використання способів і засобів прогнозу та захисних міроприємств. Актуальність розробок та впроваджень сучасних способів та методів контролю за станом масиву порід є завжди, тому що безпечність праці гірників є важливою задачею вугільної промисловості. На сьогодні технічна забезпеченість багатьох шахт дозволяє підвищити темпи проведення робіт, але необхідний постійний контроль для попередження або виявлення небезпечних ситуацій [3]. Для поліпшення безпеки шахтарів необхідні розробки швидких, але простих методів, портативних приборів тощо, які б надали можливість безпосереднього оцінювання і контролю за станом масиву.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні дослідження [4] мають результати випробувань в області використання гідророзриву вугільного пласта при проведенні підготовчих виробок по високогазоносним вугільним пластам з ціллю зниження газової та газодинамічної небезпеки. Небезпека ініціювання небезпечних газодинамічних явищ, в тому числі раптових викидів вугілля і газу, а також вірогідність загазовування робочого простору є основними факторами, що впливають на темпи проведення підготовчих виробок. Вказується, що створення тріщин гідророзриву в нерозвантаженому масиві ініціює потік метану, що міститься в пласті у вільному і адсорбованому виді, до свердловини. Представлені способи використання гідророзриву вугільного пласта при проведенні підготовчих виробок з урахуванням технологічних особливостей їх проведення, а також пристрій для виконання гідророзриву вугільного пласта через шпури, що пробурені в забій підготовчої виробки. Використання способу гідророзриву через шпури буде в більшій мірі сприяти зниженню газодинамічного потенціалу призабійної зони пласта. Тому, представлені способи використання гідророзриву можна використовувати сукупно для досягнення більш високих результатів із зниження газової та газодинамічної небезпеки при проведенні виробок по високогазоносним пластам. Але зазначено, що створення тріщин гідророзриву в нерозвантаженому масиві ініціює потік метану, що міститься в пласті у вільному та адсорбованому вигляді, до свердловини і не передбачений місцевий швидкий контроль якості повітряної суміші в робочому просторі.

В наступному [5] трирівневому способі пропонують видобутку вугілля і газу, де на першому рівні поєднується наземний та підземний метод видобутку. Таким чином досягається-

ся спільний видобуток ґрунтового та підземного газу. Другий рівень – це видобуток вугільних ресурсів спільно через свердловини, пробурені з поверхні, та свердловини вздовж робочої поверхні пласта. Третій рівень – це оптимізація наземних та підземних систем видобутку та утилізації, для реалізації повного використання шахтного газу та досягнення мети спільного видобутку вугілля та ШМ (шахтного метану). Тривимірний метод запобігання виділенню та контролю газу створює нову модель управління газом для одиночних вугільних пластів з високим ризиком викиду газу та реалізує всебічну координацію та єдність різних методів газового контролю просторово і за часом. Метод може ефективно гарантувати безпеку експлуатації під час механізованих гірничих робіт, реалізувати видобуток та повне використання газу з окремими джерелами, а також забезпечити керівництво та напрямки для спільного видобутку вугілля та ПМС (повітряно-метанової суміші) з подібними умовами видобутку. Але метод, що пропонується, є довгостроковим, хоча і заявляється як такий, що гарантує екологічний та безпечний видобуток вугілля і газу за умови хорошої координації між запропонованими трьома рівнями видобутку.

В методі [6, 7] враховано попередній досвід вивчення тріщинної пористості порід та запропоновано дослідження розподілення компонентів пористості по поверхні та кількісна оцінка розмірів за рахунок капілярного розповсюдження люмінесцентної рідини. За основу взяті фізичні ефекти, такі як: капілярне насичення, сорбція, люмінесценція люмінофору в ультрафіолетовому світлі. Вищезазначене має за основу вивчення характеру розподілу і розміру тріщин, фізичних явищ, а не, наприклад, контроль якості виконання противикидних заходів.

Відомий експрес-метод [8], який пропонується використовувати навіть безпосередньо шахтарями для оцінки небезпеки за газовим фактором. Метод, що представлений, дає можливість швидко і просто підвищити безпеку і економічність роботи в газоносних шахтах при використанні тепловізорів або інфрачервоних термометрів та десорбметрів. Можливе прогнозування газовиділення з дегазаційних свердловин вже при бурінні, швидке визначення газокінетичних властивостей вугілля та залишкової газонасиченості в пробах, а також оцінювання ефективності дегазації будь-яких пластів на кожній ділянці.

Але наявність хоча і мінімальних приборів (пірометра або тепловізора) та десорбметра необхідна, а також вміння робітників користуватись приладами. Вищезазначені методи і способи мають свої недоліки, які потребують додаткових досліджень, що тягне за собою додаткові матеріальні і фінансові витрати. Тому було запропоновано інший спосіб надійного та оперативного контролю стану безпеки вугільного пласта та оточуючих порід в робочій зоні. В основу корисної моделі [9] поставлено задачу створення способу проведення підготовчої виробки по викидонебезпечному вугільному пласту для забезпечення надійності оперативного контролю якості виконання противикидних заходів безпосередньо прохідниками виробки. Поставлена задача вирішується тим, що спосіб проведення підготовчої виробки по викидонебезпечному вугільному пласту включає буріння випереджаючих свердловин, гідророзпушування вугільного пласта з високонапірним нагнітанням у нього води та механічне руйнування вугілля й гірських порід. Згідно корисної моделі, випереджаючі свердловини бурять в породах підшви пласта в напрямку майбутнього розташування пластової виробки, при гідророзпушуванні вугільного пласта до води додають пігмент світлого кольору. Далі виконують відсмоктування метану зі свердловини, а механічне руйнування пласта й гірських порід при проведенні виробки виконують у межах простору, обробленого пігментом. Вказані ознаки складають суть запропонованої корисної моделі, тому що вони є необхідними і достатніми для досягнення технічного результату – забезпечення надійного оперативного контролю якості виконання противикидних заходів безпосередньо прохідниками виробки.

При проведенні підготовчої виробки по газонасичених викидонебезпечних пластах випереджаючі свердловини бурять у породах підшви пласта (рис. 1), що виключає вірогідність мікровикидів вугілля та газу в порожнечу свердловини та затискання бурового інструмента. Гідророзпушування гірського масиву виконують таким чином, щоб тріщини утворювались як у вугільному пласті, так і у породах, що його вміщують. В результаті утворюються канали для фільтрації метану до свердловини. Після гідравлічної обробки гірничого масиву воду зі свердловини відкачують та підключають до дегазаційної мережі. Відсмоктування газової суміші зі свердловини призводить до ліквідації небезпеки викиду вугілля й газу в межах простору, в якому утворено тріщини. Додавання пігменту світлого кольору до водяного розчину призво-

дить до забарвлення стінок тріщин. Прохідники виробки візуально оцінюють наявність або відсутність пігменту на стінках тріщин. Вибій виробки спрямовують у межі простору, де існує забарвлення стінок тріщин.

При проведенні пластової виробки за допомогою прохідницького комбайна реалізується швидкісна проходка. Прохідники візуально контролюють стан безпеки пласта та оточуючих порід за наявністю пігменту на стінках тріщин. Межі безпечного простору позначаються залишками пігменту на стінках тріщин, що свідчить про відсутність загрози викиду. Далі проводиться наступний цикл виїмки порід та вугілля з поверхні вибою. Застосування запропонованого способу дозволяє значно знизити витрати коштів та часу на виконання операцій з оцінки викидонебезпечності, забезпечити швидкісне та безпечне проведення підготовчих виробок комбайном по викидонебезпечних газонасичених вугільних пластах. Однак, натурних досліджень в шахтних умовах проведено не було, тому запропоновану технологію використано в лабораторних умовах.

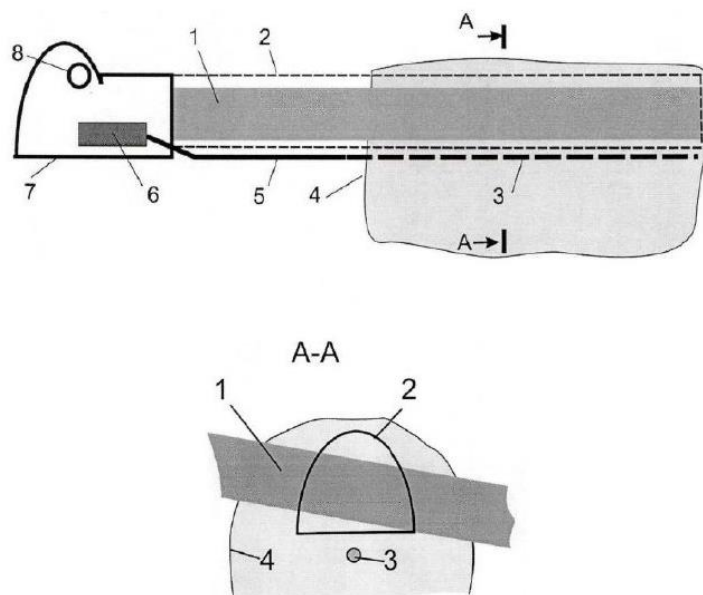


Рис. 1 – Схема розташування свердловини вздовж виробки: 1 – вугільний пласт; 2 – підготовча виробка; 3 – свердловина; 4 – контур розпушення; 5 – ділянка нерозчленованої свердловини; 6 – буровий верстат; 7 – магістральна виробка; 8 – дегазаційний трубопровід

Мета досліджень – завдяки лабораторним випробуванням показати можливість реалізації запропонованого способу оперативного контролю стану безпеки вугільного пласта та оточуючих порід в шахтних умовах.

Виклад основного матеріалу. В лабораторних умовах були проведені дослідження обробки пігментом пісковиків різної пористості і вугілля. Було використано установку зі створення підвищеного гідравлічного тиску на породні зразки, в якості робочого тіла використовували водний розчин ПАР (поверхнево-активної речовини) з додаванням барвника зеленого кольору. Установка містила наступне обладнання: компресор для створення розрідження у замкненому просторі, манометр – для контролю тиску, ємність для підтримки постійного тиску в замкненому просторі, ємність з рідиною, що містить барвник та ПАР (для більшого контакту поверхні зразка з забарвленою рідиною). За допомогою компресора створювалось розрідження у замкненому просторі. За рахунок перепаду тиску поровий простір зразків, що був заповнений повітрям, заповнився рідиною, насиченою барвником (рис. 2).

В результаті тридцятихвилинного насичення зразки частково набули кольору барвника.

Для подальшого дослідження і оцінки проникнення пігменту вглиб поверхонь зразки розкололи за допомогою преса ГП-50 (рис. 3).

Результати насичення і оцінка проникнення пігменту проведено методом мікроскопії за допомогою портативного мікроскопа (рис. 4).



Рис. 2 – Фото установки для створення розрідження: 1 – компресор; 2 – манометр; 3 – скляна ємність; 4 – ємність із зануреними в забарвлену рідину зразками



Рис. 3 – Фото преса гідравлічного ГП-50



Рис. 4 – Фото портативного USB-мікроскопа

На знімках, отриманих за допомогою мікроскопа, видимі профарбовані зони поверхонь при 10-кратному збільшенні та зони, збільшені у 50 раз (рис. 5, поз. 1).

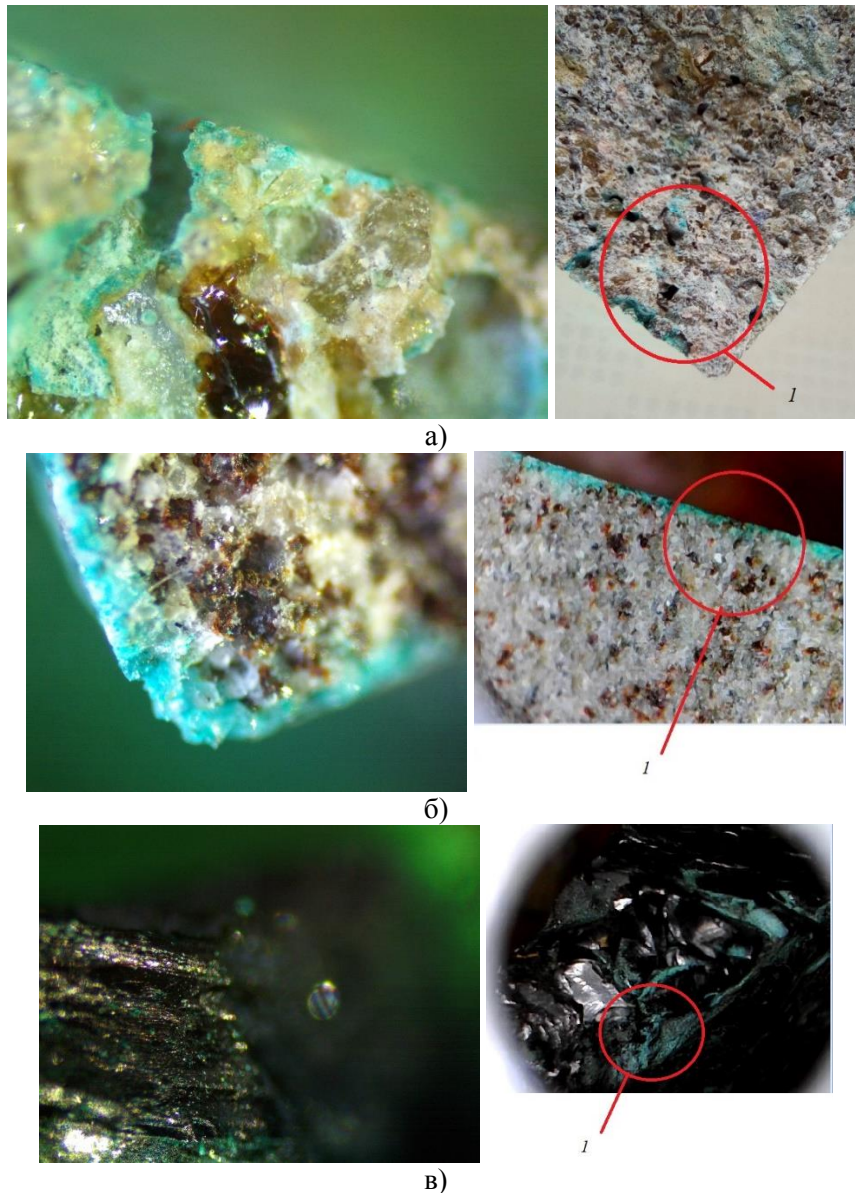


Рис. 5 – Вигляд зламів при збільшенні (поз. 1) під мікроскопом: а – пористий пісковик; б – пісковик; в – вугілля

За отриманими знімками видно, що наочне оцінювання фарбування вугілля ускладнене за рахунок темного кольору як самого зразка, так і барвника. На зразках пісковика оцінити глибину профарбованості значно легше. Також можна зробити висновок, що в пористий зразок проникнення пігменту було глибшим майже у 10 разів, ніж у поверхні пісковика менш пористого. На глибину проникнення барвника в матеріал впливає тріщинуватість, зовнішні чинники, такі як тиск, і діючі речовини, що підвищують гідрофільність матеріалу.

Висновки

Лабораторні випробування показали можливість реалізації запропонованого способу в шахтних умовах. При цьому можливе використання портативного мікроскопу. З його допомогою достовірно визначається проникнення барвника у вміщуючі породи і вугілля. Важливою умовою є вибір пігменту, враховуючи результати лабораторних досліджень; колір повинен бути контрастним або з люмінофорними властивостями. Враховуючи постійну необхідність у контролюванні безпечності стану робочого середовища та попередній досвід і розробки в цьому напрямку, які не повністю враховують всі аспекти безпеки, вперше запропоновано метод нао-

чної оцінки стану масиву безпосередньо шахтарями в процесі роботи, після використання гідророзпушення з додаванням барвника. За наявності кольору пігменту на стінках тріщин можливо оцінити безпечність ситуації для проведення подальших робіт. Тобто, стан робочого середовища може бути оцінений самим працівником на робочому місці. Також слід зазначити маловитратність даного способу з економічної точки зору.

Перелік використаних джерел:

1. Кочерга В.М. Обґрунтування параметрів способу дегазації виїмкової ділянки з використанням свердловин у неконтрольованих виробках : дис. ... канд. техн. наук : 05.15.09 / Кочерга Віктор Миколайович ; НАН України, Ін-т геотехн. механіки ім. М.С. Полякова. – Дніпро, 2018. – 214 с.
2. Ларин М.К. Виды и причины газодинамических явлений на угольных шахтах / М.К. Ларин, И.Г. Розум, К.И. Бушуев // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. – 2019. – № 4 (30). – С. 25-27.
3. Козырева Е.Н. Возможности повышения эффективности управления газовой выделением на выемочном участке / Е.Н. Козырева // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2017. – № 3. – С. 30-35. – Mode of access: <https://doi.org/10.26631/arc3-2017-30-35>.
4. Плаксин М.С. Применение технологии гидроразрыва угольного пласта при проведении подготовительных выработок / М.С. Плаксин // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2017. – № 3. – С. 16-22. – Mode of access: <https://doi.org/10.26631/arc3-2017-16-22>.
5. A gas outburst prevention and control strategy for single thick coal seams with high outburst risk: A case study of Hudi Coal Mine in Qinshui Basin / H. Li, J. Ma, Z. Wang, W. Wang, Y. Liu // Energy Science & Engineering. – 2020. – Vol. 8, iss. 7. – Pp. 2471-2491. – Mode of access: <https://doi.org/10.1002/ese3.680>.
6. Метод и устройство для оценки распределения показателей пористости по поверхности аншлифа угля / А.С. Танайно, Б.Б. Сиволап, Е.А. Максимовский, О.А. Персидская // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2016. – № 6. – С. 187-195.
7. Жуков В.С. Анализ некоторых способов оценки трещинной пористости / В.С. Жуков, В.В. Моторыгин // Вести газовой науки. – 2017. – № 3 (31). – С. 207-215.
8. Радченко С.А. Малозатратный экспресс-метод оценки опасности по газовому фактору при буровых и проходческих работах в угольных шахтах / С.А. Радченко, Н.Г. Матвиенко // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2015. – № 9. – С. 220-226.
9. Пат. 142087 Україна, МПК Е 21 F 5/02, Е 21 F 7/00. Спосіб проведення підготовчої виробки по викидонебезпечному вугільному пласту / В.К. Костенко, Я.О. Ляшок, О.Л. Зав'ялова, О.П. Когтева. – № u201911749; заявл. 09.12.2019; опубл. 12.05.2020, Бюл. № 9. – 5 с.

References:

1. Kocherha V.M. *Obgruntuvannia parametriv sposobu degazatsii viimkovoï dil'nitsi z vikoristanniam sverdlovin u nekontrol'ovanikh virobkakh*. Diss. kand. techn. nauk [Substantiation of parameters of the method of degassing of the excavation site using wells in uncontrolled workings. Cand. tech. sci. diss.]. Dnipro, 2018. 214 p. (Ukr.)
2. Laryn M.K., Rozum I.H., Bushuev K.I. *Vidy i prichiny gazodinamicheskikh yavlenii na ugolnykh shakhtakh* [Types and causes of gas-dynamic phenomena in coal mines]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo industrial'nogo universiteta – Bulletin of the Siberian State Industrial University*, 2019, vol. 4 (30), pp. 25-27. (Rus.)
3. Kozyreva Ye.N. *Vozmozhnosti povysheniia effektivnosti upravleniia gazovydeleniem na vyemochnom uchastke* [Opportunities to increase gas emission control efficiency at the extraction section]. *Vestnik nauchnogo tsentra po bezopasnosti rabot v ugol'noi promyshlennosti – Industrial Safety*, 2017, no. 3, pp. 30-35. doi: 10.26631/arc3-2017-30-35. (Rus.)
4. Plaksin M.S. *Primenenie tekhnologii gidrorazryva ugol'nogo plasta pri provedenii podgotovitel'nykh vyrabotok* [Hydraulic destruction method application for preparatory opening heading]. *Vestnik nauchnogo tsentra po bezopasnosti rabot v ugol'noi promyshlennosti – Industrial*

- Safety*, 2017, no. 3, pp. 16-22. doi: 10.26631/arc3-2017-16-22. (Rus.)
5. Li H., Ma J., Wang Z., Wang W., Liu Y. A gas outburst prevention and control strategy for single thick coal seams with high outburst risk: A case study of Hudi Coal Mine in Qinshui Basin. *Energy Science & Engineering*, 2020, vol. 8, iss. 7, pp. 2471-2491. doi: 10.1002/ese3.680.
 6. Tanaino A.S., Sivolap B.B., Maksimovskii E.A., Persidskaia O.A. Metod i ustroistvo dlia otsenki raspredeleniia pokazatelei poristosti po poverkhnosti anshlifa uglia [Method and device for assessing the distribution of porosity indicators over the surface of a polished section of coal]. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh – Journal of Mining Sciences*, 2016, no. 6, pp.187-195. (Rus.)
 7. Zhukov V.S., Motorygin V.V. Analiz nekotorykh sposobov otsenki treshhinnoi poristosti [Analysis of some methods for assessing fracture porosity]. *Vesti gazovoi nauki*, 2017, no. 3 (31), pp. 207-215. (Rus.)
 8. Radchenko S.A., Matvienko N.G. Malozatratnyi ekspres-metod otsenki opasnosti po gazovomu faktoru pri burovnykh i prokhodcheskikh rabotakh v ugolnykh shakhtakh [Low-cost express method for assessing the hazard by the gas factor during drilling and tunneling operations in coal mines]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten' (nauchno-tehnicheskii zhurnal) – Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)*, 2015, no. 9, pp. 220-226. (Rus.)
 9. Kostenko V.K., Liashok Ya.O., Zavalova O.L., Kohteva O.P. *Sposib provedennia pidhotovchoi vyrobky po vykydonebezpechnomu vuhilnomu plastu* [The method of preparatory work on the emission hazardous coal seam]. Patent UA, no. 142087, 2020. (Ukr.)

Рецензент: В.К. Костенко
д-р техн. наук, проф., ДВНЗ «ДонНТУ»

Стаття надійшла 21.04.2021

АВІАЦІЙНИЙ ТРАНСПОРТ

УДК 004.94:351.814.33

doi: 10.31498/2225-6733.42.2021.240687

© Лавриненко О.С.*

ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ МОДЕЛЮВАННЯ ПОТОКУ ПОВІТРЯНИХ СУДЕН ЗА РАХУНОК ІМПЛЕМЕНТАЦІЇ МОДЕЛІ ГЕНЕРАЦІЇ ЙОГО ВИПАДКОВИХ ЕЛЕМЕНТІВ

У статті представлений підхід до вдосконалення методу моделювання потоку повітряних суден для інтелектуальної навчальної системи «Диспетчер Tower». Вдосконалення стосується аспекту автоматичного генерування випадкових даних для класу «Повітряне судно», що є важливою і невід'ємною частиною цієї системи. Наявність механізму генерації випадкових даних щодо повітряних суден із різними льотно-технічними характеристиками в потоці дозволяє привнести в систему динамічну і стохастичну складові. Такий підхід забезпечує змінюваність повітряної обстановки в зоні відповідальності диспетчера аеродромної диспетчерської вишки, максимально наближену до реальних умов, і дозволяє відпрацювати якісно більшу кількість технологічних операцій при управлінні повітряним рухом. Як наслідок, це дозволяє відтворити обстановку в зоні відповідальності диспетчера аеродромної диспетчерської вишки та провести перевірку адекватності еталонної моделі суб'єкта навчання. Запропоноване вдосконалення дає змогу реалізувати механізм автоматичного формування вправ різного рівня складності, додати інтелектуальну складову в систему, тим самим забезпечуючи індивідуальну траєкторію підготовки суб'єкта навчання в результаті взаємодії еталонної і поточної його моделей.

Ключові слова: випадкові дані, інтелектуальна навчальна система, еталонна модель суб'єкта навчання.

O.S. Lavrynenko. Improvement of the aircraft flow modelling method by the implementation of a model for generating its random elements. The article presents the approach to improve the aircraft flow modelling method for the intelligent training system «ATC of Tower», developed by the Department of Information Technologies of the Flight Academy of the National Aviation University. The improvement concerns the aspect of automatic random data generation for the «Aircraft» class, which is the important and integral part of this system. The presence of the mechanism for generating random data in relation to aircraft with different flight performance characteristics in the stream makes it possible to supplement the system with dynamic and stochastic components. This approach ensures the variability of the air situation in the area of responsibility of the air traffic controller of the aerodrome control tower (Tower ATCO), as close as possible to real conditions, and also makes it possible to work out a qualitatively larger number of technological operations when servicing the air traffic. The approach is based on the algorithmic generator of pseudo-random numbers and logical functions. This generator randomly identifies an airline company, a type of aircraft with specific performance characteristics, which performs flight on a random route. The listed parameters are input data for the class forming the aircraft queue in the developed training system. They make it possible to recreate the situation in the area of responsibility of the air traffic controller of the aerodrome control tower and check the adequacy of the trainee reference model. The proposed improvement makes it possible to implement a mechanism for the automatic

* диспетчер управління повітряним рухом, Регіональний структурний підрозділ «Київцентраеро» Укрпороху, аеропорт, м. Бориспіль, ORCID: 0000-0001-8783-3731, lavrykkot@gmail.com

formation of the exercises with various levels of complexity, bring an intellectual component into the system, thereby providing an individual training trajectory for the training subject as a result of the interaction between the system reference and current models.

Keywords: random data, intelligent training system, trainee reference model.

Постановка проблеми. Одним із пріоритетних напрямків процесу інформатизації сучасного суспільства є застосування інформаційних технологій в освіті, що представляє собою систему методів, процесів і програмно-технічних засобів, інтегрованих з метою збору, обробки, зберігання, поширення й використання інформації в інтересах її споживачів [1]. Зокрема, інформаційні технології дозволяють перенести акценти на *самостійну роботу* при підготовці фахівців з використанням підходів щодо формування їхньої *індивідуальної траєкторії навчання*. Інтелектуальна навчальна система (ІНС) «Диспетчер Tower», що розробляється на кафедрі інформаційних технологій Льотної академії Національного авіаційного університету, націлена забезпечити таку можливість при підготовці диспетчера аеродромної диспетчерської вишки (АДВ). Кінцевою ж метою розробки є *підвищення якості управління повітряним рухом* операторами систем навігаційного обслуговування та управління рухом і в роботі [2] запропонований метод її досягнення.

На рисунку 1 представлено концептуальну схему розробки. Специфікаціями системи передбачається робота в режимах демонстрації, навчання та контролю. Для того, щоб система була адаптивною до дій кожного конкретного користувача, необхідне впровадження таких компонентів, як поточна й еталонна моделі суб'єкта навчання. Еталонна модель, робота над якою ведеться на даний момент, – це, за суттю, стан, якого має досягти суб'єкт навчання. Еталонна модель являє собою масив даних, що складається з наступних елементів: перелік технологічних операцій, правильність виконання яких повинна контролюватися з точки зору якісних і кількісних показників; порядок (алгоритм) виконання технологічних операцій в залежності від ситуації, яка визначається повітряною та наземною обстановкою, льотно-технічними характеристиками повітряного судна (ПС), погодними умовами і т. ін.; модель циркуляції інформаційних потоків на робочому місці диспетчера АДВ, а також референсні значення часу, що витрачається на кожну технологічну операцію, щоб забезпечити можливість об'єктивного автоматичного оцінювання операторської діяльності суб'єкта навчання.

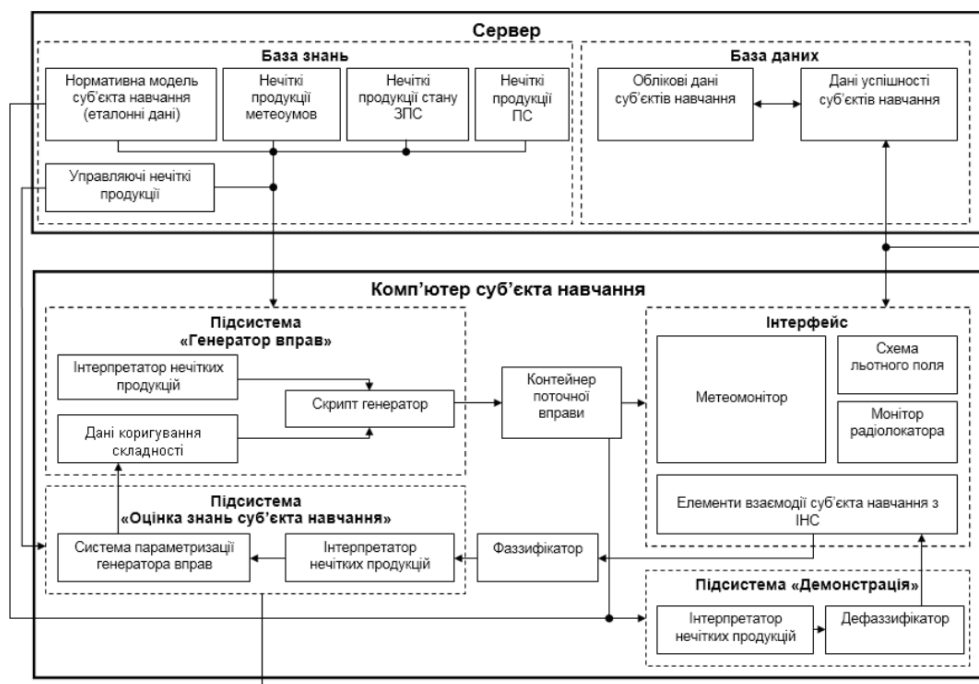


Рис 1 – Концептуальна схема інтелектуальної навчальної системи «Диспетчер Tower»

Поточна модель є динамічною, вона повинна містити таку інформацію про суб'єкта навчання, як: поточний рівень його знань, умінь і навичок; здібності до навчання; здатність виконання завдань (чи вмiє він використовувати отриману інформацію).

Поточна модель змінюється в процесі проходження навчання, тобто на основі помилок, допущених на попередніх етапах, система формує індивідуальну траєкторію навчання.

З рисунка 1 видно, що автоматичне генерування вправ різного рівня складності стає можливим при наявності бази знань щодо метеорологічних умов, стану злітно-посадкової смуги і параметрів потоку повітряних суден. Стани цих факторів визначають складність ситуації на робочому місці диспетчера АДВ. Оскільки даний фахівець постійно має справу з ПС, кількість яких має враховуватися при плануванні його робочого навантаження (пропускної спроможності), у роботі [3] увагу сфокусовано на вивченні параметрів потоку повітряних суден. Для забезпечення безпечного, впорядкованого та прискореного потоку повітряного руху диспетчеру АДВ необхідно оперувати інформацією щодо кількості ПС, з якими він буде працювати, про моменти їхнього надходження, часові інтервали між ними і категорії турбулентності в супутньому сліді [2].

На етапі розробки першого прототипу інтелектуальної навчальної системи «Диспетчер Tower» у роботі [3] запропоновано метод формування потоку повітряних суден, який забезпечує підсистему «Генератор вправ» всіма необхідними вище згадуваними параметрами. Поточний етап життєвого циклу розробки, пов'язаний з еталонною моделлю суб'єкта навчання, вимагає деталізованого технологічного аудиту процесу прийняття рішень диспетчером АДВ під час його професійної діяльності [4]. Наслідком є необхідність деталізації інформаційного оточення розроблюваного компонента. Насамперед, це стосується тісно пов'язаних між собою компонентів – еталонної моделі та параметрів потоку повітряних суден, чим і обумовлено актуальність наступних задач:

1. Формування екстенціональної частини бази знань для класу «Повітряне судно», факти якої відповідають реальній системі, шляхом проведення аналізу та синтезу необхідних льотно-технічних характеристик ПС, які можуть виконувати польоти на аеродромі, що моделюється.

2. Пошук рішення щодо можливого впровадження автоматичної диверсифікації параметрів ПС для формування інтенціональної частини бази знань з метою проведення експерименту й перевірки адекватності еталонної моделі суб'єкта навчання. Генерація різномірних елементів потоку (ПС з різними льотно-технічними характеристиками) дозволяє привнести в систему динамічну й стохастичну складову для змінюваності як повітряної обстановки, так і пов'язаної з нею еталонної моделі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вхідні дані – це величини, які задаються до початку роботи алгоритму або визначаються динамічно під час його роботи [5]. Генерація даних відноситься до теорії і методів, що використовуються дослідниками в якісному дослідженні для створення даних, які обумовлюються обраним джерелом [6]. Розглядаючи генерацію випадкових даних, необхідно розуміти, що за стохастичністю вибору стоїть визначення випадкових чисел, де значення кожного числа обумовлює відповідний масив інформації або його частину.

Генератори випадкових чисел за способом отримання чисел діляться на табличні, апаратні та алгоритмічні.

Табличні генератори в якості джерела випадкових чисел використовують заздалегідь підготовлені таблиці, що містять перевірені некорельовані числа і не є генераторами в строгому розумінні цього поняття. Недоліки такого способу очевидні: використання зовнішнього ресурсу для зберігання чисел, обмеженість послідовності, зумовленість значень.

Апаратні генератори (істинно) випадкових послідовностей повинні володіти джерелом ентропії (мірою безладдя або хаотичності). Розробка генераторів, що використовують джерела ентропії, котрі генерують не корельовані й статистично незалежні числа – досить складне завдання.

Алгоритмічний генератор є комбінацією фізичного генератора та детермінованого алгоритму. Такий генератор використовує обмежений набір даних, отриманий з виходу фізичного генератора для створення довгої послідовності чисел, за рахунок перетворення початкових чисел. Даний вид генераторів становить найбільший інтерес в силу його очевидних переваг над генераторами випадкових чисел інших видів [7].

Найчастіше в інформаційних системах використовується алгоритм генератора випадко-

вих чисел Кнута. Псевдовипадкові числа вибираються з однаковою ймовірністю з кінцевого набору чисел. Обрані числа не є строго випадковими, оскільки для їхньої вибірки використовується чіткий математичний алгоритм, але вони досить випадкові для практичного застосування.

Генерація випадкових чисел починається з початкового значення. При повторному використанні того ж початкового значення створюється та сама послідовність чисел. Одним із способів отримання різних послідовностей є вибір залежного від часу початкового значення, що дозволяє створювати різні послідовності. Наприклад, для генерації початкового значення в мові програмування C# (сі-шарп) використовується системний годинник, в той час як параметризований конструктор даного класу може приймати цілочислове значення, залежне від кількості тактів у поточному часі [8].

Застосування алгоритмічного генератора при вирішенні задачі призначення місць стоянок для повітряних суден, що прибувають, розглядалося в роботі [9], де пропонувався метод оптимізації розстановки ПС за місцями стоянок на поверхні аеродрому в складі імітаційної моделі аеродрому. Для вирішення завдання використано метод імітації відпалу (рос. «отжига»). Розроблено та апробовано два алгоритми, один із яких робить вибір найкращої стоянки (беручи до уваги близькість терміналу й наявність телетрапу), і другий – вибір випадкової стоянки. Основною перевагою даного методу є властивість уникати зациклення в локальних оптимумах та продовжувати пошук глобального оптимуму. Хоча ефективність роботи даного методу імітації відпалу було показано для великого класу задач, запропонований метод оптимізації розстановки ПС передбачає аналіз розкладу прильотів ПС, а також додаткові запити щодо розстановки від авіакомпаній і служб аеропорту.

В роботі [10], основною метою якої є оптимізація послідовності та часу посадок повітряних суден, що прибувають на злітно-посадкову смугу, пропонується програмний засіб імітаційного моделювання для аналізу ефективності й швидкодії алгоритмів планування посадки ПС. Для формування експерименту вибирається параметр P – число ПС і параметр K – кількість типів ПС. Таких типів в даній роботі розглядається чотири – дуже легке ПС, легке ПС, середнє ПС, важке ПС. Тип ПС визначається за допомогою функції генерації випадкового цілого числа із заданого діапазону $1 \div K$. $C_i = rnd.Next(K)$, $i = 1, P$. Особливістю даного підходу є прорахунок часових інтервалів між ПС, що заходять на посадку, без урахування швидкості ПС на посадковій прямій. Однак, дана швидкість відіграє найважливішу роль при формуванні самого потоку, так як визначає ймовірність скорочення інтервалу.

Із проведеного аналізу можна зробити висновок, що для вдосконалення методу моделювання потоків повітряних суден в середовищі інтелектуальної навчальної системи за рахунок розробки моделі генерування випадкових даних для елементів даного потоку, найбільш прийнятним підходом є використання алгоритмічного генератора, де вибір розгалуження здійснюється на основі ймовірнісної генерації випадкових чисел.

Метою даної роботи є вдосконалення методу моделювання потоку повітряних суден, заснованого на ймовірнісних характеристиках, за рахунок розробки та імплементації моделі генерування випадкових даних принципово необхідного переліку елементів цього потоку для інтелектуальної навчальної системи, що забезпечує самостійну роботу суб'єкта навчання.

Виклад основного матеріалу. Для еталонної моделі суб'єкта навчання, що розробляється автором на основі об'єктно-орієнтованого програмування, вхідними даними є властивості класів «Повітряне судно», «Метеоумови», «Злітно-посадкова смуга». Дані класи отримані в результаті вивчення предметної області, за допомогою анкетування та інтерв'ювання експертів (диспетчерів АДВ з різним досвідом роботи).

Для проведення експерименту як з окремими процедурами диспетчера АДВ, так і з еталонною моделлю суб'єкта навчання в цілому, а також подальшої перевірки її адекватності, для класів «Метеоумови» і «Злітно-посадкова смуга» взяті статичні вхідні дані. На поточному етапі дослідження завдання вивчення закономірностей їхніх можливих станів не поставлено.

Відносно класу «Повітряне судно» висунуто завдання формування моделі генерування випадкових даних, отриманих на підставі аналізу планової інформації аеродрому, що моделюється.

Дана модель є основою для класу *Source*, забезпечуючи його елементами потоку (повітряними судами) з присвоєними їм випадково-згенерованими змінними (льотно-технічними характеристиками ПС). Клас *Source* є частиною моделі діяльності оператора системи навігаційно-

го обслуговування та управління рухом, яку представлено в роботі [3] (рис. 2). Крім цього класу, модель оператора включає в себе також:

- Клас *Queue*, який реалізує чергу;
- Клас *Servicer*, який являє собою модель процесу прийняття рішення диспетчером АДВ, що імітує дії диспетчера в певних умовах;
- Класу *Sink* та *Sink1* – це класи, які реалізують видалення обслугованих з моделі ПС, обслуговування яких вже виконано, і тих ПС, які не дочекалися обслуговування, відповідно.

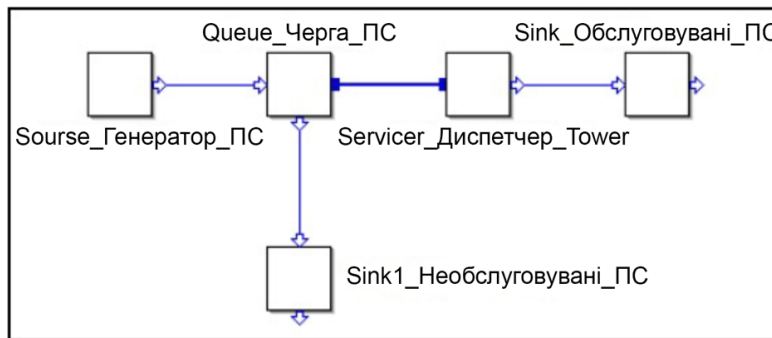


Рис. 2 – Структурна схема узагальненої моделі діяльності оператора системи навігаційного обслуговування і управління рухом як системи масового обслуговування

Для формування моделі генерації випадкових даних класу «Повітряне судно» і проведення експериментів із нею використано програмне середовище *AnyDynamics*. Генератором псевдовипадкових чисел даного програмного комплексу є алгоритм, який породжує послідовність чисел, елементи якого майже незалежні один від одного та відповідають заданому розподілу.

Для того, щоб властивості класу «Повітряне судно» відповідали реальним льотно-технічним характеристикам ПС, проведено аналіз розкладу вильотів-прильотів ПС конкретного аеродрому (за основу взято аеродром Запоріжжя, Україна), на основі якого сформовано перелік авіакомпаній та їхніх напрямків польоту (аеродром вильоту/призначення). Також проаналізовано флот кожної авіакомпанії, що дозволило визначити типи ПС, які можуть виконувати польоти за даними маршрутами, та отримати конкретні показники льотно-технічних характеристик для кожного типу ПС. Частина результатів аналізу в якості прикладу представлена в таблиці 1.

Таблиця 1

Аналіз авіакомпаній та льотно-технічних характеристик повітряних суден для класу «Повітряне судно»

Назва авіакомпанії/ код ІКАО (реєстраційний номер)	Тип ПС	Крейсерська швидкість ПС, км/год	Дальність польоту ПС, км	Категорія турбулентності в супутньому сліді	Швидкість ПС на посадковій прямій, км/год
«Мотор Січ»/MSI	Ан-12Б	570	3600	Середнє (М)	230
	Ан-140-100	540	3680	Середнє (М)	225
	Ан-24РВ	460	2000	Середнє (М)	165
	Ан-74ТК-200	600	4325	Середнє (М)	180
	Як-40	510	1800	Середнє (М)	150
«Міжнародні авіалінії України»/AUI	Boeing 737-800	852	5765	Середнє (М)	263
	Boeing 737-900ER	852	5925	Середнє (М)	261
	Embraer E190	890	3200	Середнє (М)	260
«Turkish Airlines»/THY	Airbus A319-100	840	6800	Середнє (М)	242
	Airbus A320-200	840	6150	Середнє (М)	248
...

Продовження таблиці 1

Назва авіакомпанії/ код ІКАО (реєстраційний номер)	Пробіг, м	Розбіг, м	Аеропорт призначення/ вильоту	Дальність від UKDE (Запоріжжя)
«Мотор Січ»/MSI	500	900-2200	OBBI (Бахрейн)	3640
			OIE (Тегеран)	3030
			OOSA (Бавшар)	4610
			UBBB (Баку)	2980
	880	880	UKKK (Жуляни)	414
			UMMS (Мінськ)	846
	580	650	UKKK (Жуляни)	414
			UMMS (Мінськ)	846
	700	2050	UGTB (Тбілісі)	1790
			LYPG (Подгориця)	1450
750	1250	UKKK (Жуляни)	414	
		UMMS (Мінськ)	846	
«Міжнародні авіалінії України»/AUI	1630	2241	UKBB (Бориспіль)	380
			LTAI (Анталья)	1470
			HESH (Шарм-эль-Шейх)	2520
	1750	2450	UKBB (Бориспіль)	380
			LTAI (Анталья)	1470
			HEGN (Хургада)	2590
1260	1890	UKBB (Бориспіль)	380	
«Turkish Airlines»/THY	1450	1520	LTFM (Стамбул)	1000
	1530	2090	LTFM (Стамбул)	1000
...

При формуванні моделі генерації випадкових вхідних даних класу «Повітряне судно» за допомогою функції генерації випадкових чисел *uniform* програмного середовища *AnyDynamics* генерація випадкового вибору проводилася на наступних етапах: вибір авіакомпанії; вибір типу ПС; вибір напрямку (аеродром призначення/вильоту).

Функція *uniform* передбачає генерацію випадкових чисел у заданому проміжку відповідно до рівномірного закону розподілу. Отже, кожній з авіакомпаній, типу ПС і напрямку присвоєні свої числові значення. Таким чином, для даної моделі розроблено інтенціональну частину (правила) з використанням логічних (булевих) функцій «істинно» та «хибно».

Після проходження генерації випадкових чисел, значення яких присвоєно конкретному факту екстенціональної частини бази знань, й оперування цими фактами за допомогою правил інтенціональної частини, отримуються вихідні дані моделі генерації випадкових даних класу «Повітряне судно», а саме випадковий тип ПС, що має конкретні льотно-технічні характеристики, що відносяться до обраної випадковим чином авіакомпанії, яка виконує політ за випадковим маршрутом. Вихідні дані зазначеної вище моделі, в свою чергу, є вхідними даними для класу *Queue*, який формує чергу ПС, що вилітають та прибувають.

На рисунку 3 представлено програмну реалізацію в середовищі *AnyDynamics* моделі генерації випадкових даних класу «Повітряне судно». Дана модель або карта поведінки складається зі станів, розгалужень і переходів. Стани представлені у вигляді прямокутника з закругленими кутами і відповідають деякому тривалому якісному стану об'єкта, що моделюється. Стан «Vubir_AK» відповідає за генерацію псевдовипадкового значення, яке обумовлює конкретну авіакомпанію. Ромбами відзначені точки розгалуження переходів (стрілки), де перевіряється відповідність згенерованого значення з призначеним значенням наступного стану. Стани «MSI», «AUI», «THY», «UTN», «PGT» та «UJX» мають назву відповідно коду авіакомпаній ІКАО (Міжнародної організації цивільної авіації).

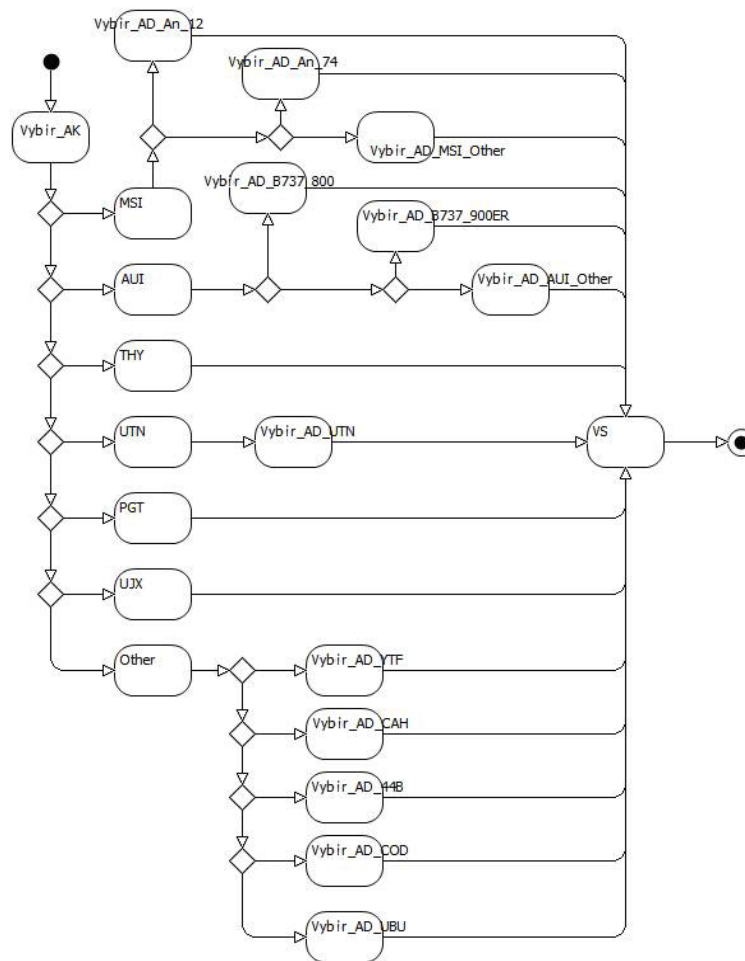


Рис. 3 – Реалізація моделі генерації випадкових даних класу «Повітряне судно» в програмному середовищі AnyDynamics

Вихідними параметрами цих станів є виконання вибору ймовірного типу повітряного судна з флоту, що може виконувати польоти до/з аеродрому, що моделюється, а також призначення вхідним даним системи конкретних параметрів льотно-технічних характеристик обраного ПС. Стан «Other», в свою чергу, робить такий самий вибір та призначення параметрів, але вибір виконується з переліку приватних авіакомпаній, де найчастіше флот складається з одного літака. Відповідно до аналізу планової інформації виявлено п'ять таких авіакомпаній (літаків), які найчастіше виконують польоти на аеродромі, що моделюється. Стан, який має назву «VS», в результаті роботи моделі передає сформовані вхідні данні в систему. Інші стани системи генерують аеродром вильоту або призначення для обраного типу ПС в залежності від напрямлень, які виконує та чи інша компанія, та максимальної дальності польоту, обраного на попередньому етапі ПС. Такі стани, як «THY», «PGT», «UJX», не мають подальших розгалужень з приводу того, що ці авіакомпанії виконують рейси лише за одним напрямком (наприклад: авіакомпанія «Turkish Airlines» з ICAO кодом «THY» з аеропорту Запоріжжя виконує рейси до аеропорту Стамбула).

Маючи значення пропускної здатності для конкретного аеродрому, значення мінімальних інтервалів ешелонування ПС і використовуючи клас *Source_Генератор_ПС*, який є частиною моделі діяльності оператора системи навігаційного обслуговування і управління рухом, навчальна система за допомогою класу *Queue* здатна згенерувати вхідні дані для еталонної моделі – потік повітряних суден. Потік являє собою певну кількість ПС, їхній час вильоту і час прибуття, які буде отримано на підставі обліку часу вильоту конкретного ПС з інших аеродромів. Частота як прибуття, так і вильоту, формується відповідно до експоненціального закону розподілу (закон

був визначений при дослідженні закономірностей формування потоку ПС у зоні відповідальності диспетчера АДВ), а також з урахуванням інтервалів ешелонування ПС у районі відповідальності диспетчера АДВ. Користувач (суб'єкт навчання), в свою чергу, повинен контролювати витримування заданих суміжним органом управління повітряним рухом інтервалів у своєму секторі й випускати ПС із урахуванням інтервалів та обстановки в своєму й суміжному секторах.

Перевірка роботи моделі генерування випадкових даних проводилась у складі імітаційної моделі еталонного процесу прийняття рішень на робочому місці диспетчера аеродромної диспетчерської вишки (еталонної моделі суб'єкта навчання для інтелектуальної навчальної системи «Диспетчер Tower»). В результаті прогону в діалоговому вікні системи відображаються повідомлення щодо сформованих елементів потоку. Повідомлення, що інформує про ПС, що виконує заходження на посадку, містить такі дані як: радіотелефонний позивний; аеропорт вильоту; тип ПС; категорія турбулентності в сліді.

Приклад: (BCз ", "UR-UBU Відень, BE 350 (L) ").

Повідомлення, яке інформує про ПС, що вилітає, містить наступні дані: радіотелефонний позивний; аеропорт призначення; назва маршруту виходу з району аеродрому за приладами (SID – standard instrument departure); тип ПС; категорія турбулентності в сліді; стоянка для ПС.

Приклад: ("BCв", "MSI740, Тбілісі, DITIX4A, Ан-74 (М) ст.№ 41").

Диверсифікація льотно-технічних характеристик ПС в результаті багаторазового прогону імітаційної моделі показала, що в достатній мірі та наближено до реальних умов впливає як на час виконання деяких процедур авіадиспетчера, так і процес приймання рішень ним в цілому.

Висновки

В рамках проведеної роботи отримані наступні результати:

1. Сформовано екстенсіальну частину бази знань для класу «Повітряне судно» на основі проведеного аналізу планової інформації аеродрому, що моделюється. Факти цієї частини бази знань є вхідними даними для еталонної моделі суб'єкта навчання.
2. Рішенням для впровадження автоматичної диверсифікації параметрів ПС для формування інтенціональної частини бази знань стало вдосконалення методу моделювання потоку повітряних суден у середовищі інтелектуальної навчальної системи. Вдосконалення стосується розробки та подальшої імплементації моделі генерування випадкових даних для елементів потоку. Наявність згенерованих даних, що стосуються повітряних суден з різними льотно-технічними характеристиками в потоці, впливає як на змінюваність повітряної обстановки, так і на технологію роботи диспетчера аеродромної диспетчерської вишки в цілому, аж до зміни часу виконання технологічних операцій при управлінні повітряним рухом. Це, в свою чергу, дозволило привнести в систему динамічну й стохастичну складові та провести експеримент із еталонною моделлю суб'єкта навчання для перевірки її адекватності.

Перелік використаних джерел:

1. Горбунова Л.И. Использование информационных технологий в процессе обучения / Л.И. Горбунова, Е.А. Субботина // Молодой ученый. – 2013. – № 4. – С. 544-547.
2. Піліпюнок О.М. Метод підвищення якості управління повітряними суднами операторами систем навігаційного обслуговування й управління рухом [Текст] : дис... канд. техн. наук : 05.22.13 / Піліпюнок Оксана Миколаївна. – Кропивницький, 2017. – 265 с.
3. Джума Л.Н. Моделирование потока воздушных судов в зоне ответственности диспетчера Tower / Л.Н. Джума, О.Н. Пилипёнок // Научные записки Украинского научно-исследовательского института связи. – К. : Украинский НИИ связи, 2015. – № 5 (39). – С. 93- 97.
4. Dzhuma L. Revealing the Regularities Related to the Professional Activities of the Air Traffic Controller of Airport Traffic Control Tower / L. Dzhuma, O. Dmitriiev, O. Lavrynenko, M. Soroka // Technology Audit and Production Reserves. – 2021. – Vol. 3, № 2 (59). – Pp. 29-40. – Mode of access: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2021.235456>.
5. Кнут Д.Э. Искусство программирования : в 4 т. / Д.Э. Кнут. – М. : Вильямс, 2002. – 1 т. – (Основные алгоритмы). – 720 с.
6. Given L.M. The SAGE encyclopedia of qualitative research methods / Lisa M. Given. – Thousand

- Oaks, CA: SAGE Publications, Inc., 2008. – Vol. 2. – 1014 p. – Mode of access: <https://doi.org/10.4135/9781412963909>.
7. Слеповичев И.И. Генераторы псевдослучайных чисел / И.И. Слеповичев. – Саратов: СГУ, 2017. – 117 с.
 8. Калинин А.А. Разработка алгоритмов с использованием принципов ООП на языке С# : учебно-методическое пособие / А.А. Калинин. – М. : МГУП имени Ивана Федорова, 2014. – 106 с.
 9. Егоркина А.В. Метод оптимизации расстановки воздушных судов по местам стоянок на поверхности аэродрома в составе имитационной модели аэродрома / А.В. Егоркина, К.А. Вересов // Имитационное моделирование. Теория и практика. – 2017. – №. 2. – С. 368-373.
 10. Кулида Е.Л. Система анализа алгоритмов оптимизации последовательности и времен посадок прибывающих воздушных судов / Е.Л. Кулида // Управление развитием крупномасштабных систем MLSD'2020. – 2020. – С. 1528-1534.

References:

1. Gorbunova L.I., Subbotina E.A. Ispol'zovanie informatsionnykh tekhnologii v protsesse obucheniia [The use of information technology in the education process]. *Molodoi uchenyi – Young Scientist*, 2013, no. 4, pp. 544-547. (Rus.)
2. Dzhuma L.N., Pilipenok O.N. Modelirovanie potoka vozdushnykh sudov v zone otvetstvennosti dispetchera Tower [Modeling of the air traffic flow in the area of Tower controller's responsibility]. *Nauchnye zapiski Ukrainського nauchno-issledovatel'skogo instituta svyazi – Scientific proceeding of Ukrainian research institute of communication*, 2015, no. 5 (39), pp. 93-97. (Rus.)
3. Pilip'onok O.M. *Metod pidvishchennia iakosti upravlinnia povitrianimi sudhami operatorami sistem navigatsiinogo obslugovuvannia i upravlinnia rukhom*. Diss. kand. techn. nauk [Method of improving the aircraft management of operators of the navigation service systems and traffic control Cand. tech. sci. diss.]. Kropivnits'kii, 2017. 265 p. (Ukr.)
4. Dzhuma L., Dmitriiev O., Lavrynenko O., Soroka M. Revealing the Regularities Related to the Professional Activities of the Air Traffic Controller of Airport Traffic Control Tower. *Technology Audit and Production Reserves*, vol. 3, no. 2 (59), 2021, pp. 29-40. doi: **10.15587/2706-5448.2021.235456**.
5. Knut D.E. *Iskusstvo programmirovaniia*. Tom 1. Osnovnye algoritmy [The Art of Computer Programming. Volume 1. Fundamental Algorithms]. Moscow. Vil'iams Publ., 2002, no. 3. 720 p.
6. Given L.M. The SAGE encyclopedia of qualitative research methods. Vol. 2. Thousand Oaks, CA, SAGE Publications, Inc., 2008. 1014 p. doi: **10.4135/9781412963909**.
7. Slepovichev I.I. *Generatory psevdosluchainykh chisel* [Pseudo-random number generators]. Saratov, SGU Publ., 2017. 117 p. (Rus.)
8. Kalinin A.A. *Razrabotka algoritmov s ispol'zovaniem printsipov OOP na iazyke S# : uchebno-metodicheskoe posobie* [Development of algorithms using the principles of object-oriented programming in C #: a tutorial]. Moscow, Moscow State Unitary Enterprise named after Ivan Fedorov Publ., 2014. 106 p. (Rus.)
9. Egorkina A.V., Veresov K.A. Metod optimizatsii rasstanovki vozdushnykh sudov po mestam stoyanok na poverkhnosti aerodroma v sostave imitatsionnoi modeli aerodroma [Method of optimization of aircraft placement by parking areas on the surface of an aerodrome as part of a simulation model of an aerodrome]. *Imitatsionnoe modelirovanie. Teoriia i praktika – Simulation modeling. Theory and practice*, 2017, no. 2, pp. 368-373. (Rus.)
10. Kulida E.L. Sistema analiza algoritmov optimizatsii posledovatel'nosti i vremen posadok pribyvaiushchikh vozdushnykh sudov [System for analyzing algorithms for optimizing the sequence and landing times of arriving aircraft]. *Upravlenie razvitiem krupnomasshtabnykh sistem MLSD'2020 – Managing the development of large-scale systems MLSD'2020*, 2020, pp. 1528-1534. (Rus.)

Рецензент: Ю.В. Сікірда
канд. техн. наук, доц., ЛА НАУ

Стаття надійшла 01.03.2021

ЗАЛІЗНИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

УДК 629.463.65

doi: 10.31498/2225-6733.42.2021.240690

© Панченко С.В.¹, Фомін О.В.², Ватуля Г.Л.³, Ловська А.О.⁴,
Павлюченков М.В.⁵, Рибін А.В.⁶**ОБҐРУНТУВАННЯ ВПРОВАДЖЕННЯ SIN-БАЛОК
В НЕСУЧУ КОНСТРУКЦІЮ НАПІВВАГОНА**

Проведено наукове обґрунтування впровадження SIN-балок в несучу конструкцію універсального напіввагона. Дослідження проведені стосовно напіввагона моделі 12-757 побудови ПАТ «Крюківський вагонобудівний завод». Використання SIN-балок в якості основних несучих елементів рами сприяє зменшенню її маси на 6% у порівнянні з рамою вагона-прототипу. Здійснено розрахунок на міцність рами напіввагона з SIN-балками в якості несучих елементів. При цьому використано програмний комплекс SolidWorks Simulation, який реалізує метод скінчених елементів. В якості скінчених елементів застосовані просторові ізопараметричні тетраедри. Встановлено, що максимальні еквівалентні напруження виникають в зоні взаємодії хребтової балки зі шворневою та складають близько 335,3 МПа і не перевищують допустимі. Максимальні переміщення зосереджені в центральній частині рами та склали близько 29,0 мм. Визначено основні показники динаміки несучої конструкції напіввагона. Розрахунок здійснений за умови руху напіввагона у порожньому стані стиковою нерівністю, як випадку найбільшої навантаженості несучої конструкції. При проведенні розрахунків враховувалися параметри ресорного підвищення візка моделі 18-100. При цьому дослідження проведені у плоскій системі координат. Розв'язок диференціальних рівнянь руху проведений в програмному комплексі MathCad. Розрахунок здійснений за методом Рунге-Кутта. Встановлено, що показники динаміки напіввагона знаходяться у допустимих межах. Максимальні прискорення кузова напіввагона в центрі мас складають 4,8 м/с². Прискорення візків дорівнюють 5,7 м/с². При цьому оцінка ходу напіввагона є «відмінною». Проведені дослідження сприятимуть створенню інноваційних конструкцій вагонів, зменшенню витрат на їх виготовлення, а також підвищенню ефективності функціонування залізничного транспорту.

Ключові слова: транспортна механіка, напіввагон, несуча конструкція, SIN-балка, міцність рами, динамічна навантаженість.

S.V. Panchenko, O.V. Fomin, G.L. Vatulia, A.O. Lovska, M.V. Pavliuchenkov, A.V. Rybin. The feasibility of installing sin-beams in the load-bearing structure of the open car. The scientific substantiation of SIN-beam installation into the load-bearing structure of a nonversatile filling car was carried out. The research was carried out with

¹ д-р техн. наук, професор, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, ORCID: 0000-0002-7626-9933, panchenko074@ukr.net

² д-р техн. наук, професор, Державний університет інфраструктури та технологій, м. Київ, ORCID: 0000-0003-2387-9946, fomin1985@ukr.net

³ д-р техн. наук, професор, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, ORCID: 0000-0002-3823-7201, glebvatulya@gmail.com

⁴ д-р техн. наук, доцент, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, ORCID: 0000-0002-8604-1764, alyonaLovskaya.vagons@gmail.com

⁵ канд. техн. наук, доцент, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, ORCID: 0000-0003-0542-7284, pavliuchenkov@ukr.net

⁶ ст. викладач, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, ORCID: 0000-0003-4430-8018, rybinandrey2006@gmail.com

regard to the freight car model 12-757 produced by Krukivsky Carriage Works. Use of SIN-beams as the main bearing elements of the frame reduces its weight by 6% in comparison with the frame of the prototype car. The strength of the frame of the car with SIN-beams as load-bearing elements has been calculated. At that, the SolidWorks Simulation program complex was used, which implements the method of joined elements. Spatial isoparametric tetrahedrons were used as the joined elements. It was found that the maximum equivalent loads occur in the area of interaction between the trunk beam and the kingpin beam are close to 335.3 MPa and do not exceed the permissible values. The maximum displacements are centered in the central part of the frame and are about 29.0 mm. The main indices of the load-bearing structure dynamics of the freight car were determined. The calculation was carried out under the conditions of empty wagon running with steep nerves, as a case of the highest load of the load-carrying structure. When carrying out the calculations, the parameters of the suspension arm of the model 18-100 were taken into account. At the same time, the investigation was carried out in the flat coordinate system. The differential equations of motion were developed in the MathCad software package. The calculation was carried out by the Runge-Kutta method. It was found that the indicators of the dynamics of the car are within the permissible limits. The maximum acceleration of the wagon body in the center of mass is 4.8 m/s². The acceleration of the cars is 5.7 m/s². In this case, the evaluation of the movement of the wagon is «excellent». The conducted research will contribute to the creation of innovative carriage designs, reduction of costs for their production, as well as increasing the efficiency of railway transport functioning.

Keywords: *transport mechanics, wagon, load-bearing structure, SIN-beam, frame strength, dynamic load capacity.*

Постановка проблеми. Ефективність функціонування транспортної галузі є запорукою розвитку економіки євразійських країн. Оскільки найбільш пріоритетним видом транспорту є залізничний, то до створення сучасного рухомого складу повинна приділятися особлива увага. Для забезпечення конкурентоспроможності рухомого складу важливим є урахування на стадії його проектування принципово нових інноваційних рішень. Дані рішення повинні бути спрямовані на зменшення матеріалоємності несучих конструкцій при забезпеченні умов міцності та експлуатаційної надійності. Досягти цього можливо шляхом обґрунтування та впровадження нових матеріалів в несучі конструкції вагонів, профілів, зв'язків тощо. Це дозволить знизити матеріалоємність вантажних вагонів, підвищити вантажопідйомність, збільшити середні швидкості руху в завантаженому та порожньому станах, покращити антикорозійні та антифрикційні властивості, збільшити термін служби та зменшити загальну виробничу та експлуатаційну собівартість.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Передумови для збільшення частки ринку залізничних вантажних перевезень висвітлюються у роботі [1]. Наведені міркування, які повинен враховувати сучасний залізничний транспорт. Особливу увагу приділено припущенням про впровадження інноваційних вагонів та сферах їх впливу. Однак при цьому у роботі не оговорено вимог щодо проектування сучасного рухомого складу.

Аналіз конструкції інноваційного вантажного вагона для комбінованих перевезень вантажів у міжнародному сполученні висвітлюється у роботі [2]. Зазначені переваги застосування даного вагона у порівнянні з існуючими конструкціями. Разом з цим при проектуванні зазначеної конструкції вагона не враховано заходів щодо зменшення його тари.

Особливості застосування матеріалів нового покоління для зменшення тари залізничних вагонів висвітлено у роботі [3]. Авторами розглянуті перспективи застосування магнієвих сплавів в конструкціях залізничних вагонів. Разом з цим в роботі відсутні результати обґрунтування магнієвих сплавів в несучі конструкції вагонів.

Заходи щодо удосконалення несучої конструкції вагона з метою підвищення ефективності його експлуатації висвітлено у роботі [4]. Наведено результати розрахунку на міцність несучої конструкції вагона. Однак дані технічні рішення не забезпечують зменшення тари несучої конструкції вагона при дотриманні умов міцності та експлуатаційної надійності.

Обґрунтування застосування раціональної конструкції рами напіввагона шляхом

комп'ютерного моделювання проводиться в роботі [5]. Наведені результати розрахунку на міцність рами напіввагона, які підтвердили доцільність запропонованих заходів. При цьому запропоновані рішення спрямовані на удосконалення конструкції рами та не сприяють зменшенню тари напіввагона.

Структурно-динамічний аналіз несучої конструкції напіввагона з використанням методу скінчених елементів проводиться в роботі [6]. Визначено власні частоти коливань запропонованої конструкції вагона. Однак запропоновані конструкційні рішення не забезпечують зниження тари вагона.

Заходи щодо зменшення динамічної навантаженості несучих конструкцій вагонів для підвищення ефективності їх експлуатації наведені у роботах [7, 8]. Сформовані математичні моделі, які дозволяють отримати уточнені значення динамічних навантажень, що діють на несучі конструкції вагонів. Запропоновані конструкційні удосконалення несучих конструкцій вагонів. Важливо сказати, що дані рішення спрямовані на забезпечення міцності несучих конструкцій вагонів, а не зменшення їх тари.

Аналіз літературних джерел [1-8] дозволяє зробити висновок, що доцільним є проведення досліджень, які спрямовані на зменшення тари несучих конструкцій вагонів. Це сприятиме зменшенню їх матеріалоемності, а, відповідно, і витрат на виготовлення при забезпеченні умов міцності.

Метою дослідження є наукове обґрунтування впровадження SIN-балок в несучу конструкцію напіввагона. Для досягнення зазначеної мети визначені такі задачі:

- удосконалити раму напіввагона шляхом впровадження в якості несучих елементів SIN-балок;
- провести розрахунок на міцність рами напіввагона;
- визначити основні показники динаміки несучої конструкції напіввагона.

Виклад основного матеріалу. Для зниження собівартості виготовлення та експлуатації напіввагонів можливим є зниження їх тари і відповідного збільшення вантажопідйомності. Досягти цього можливо шляхом удосконалення конструкції модуля рами на основі застосування SIN-балок в якості його основних несучих елементів, перекритих горизонтальним листом, при виконанні умов міцності (рис. 1).

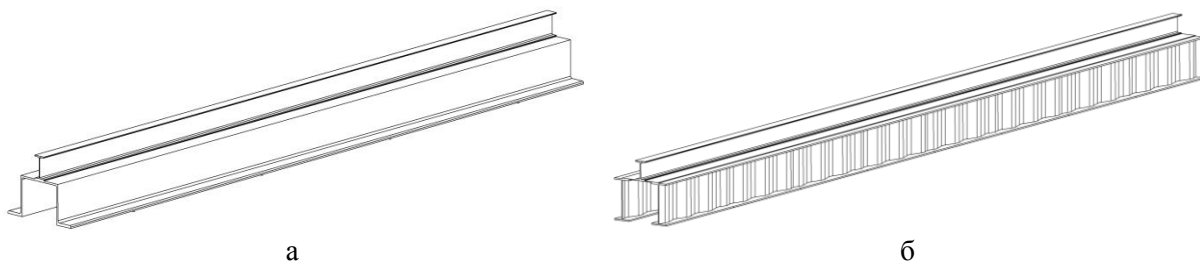


Рис. 1 – Хребтова балка напіввагона: а – типова конструкція; б – удосконалена

Геометричні параметри SIN-балок, які утворюють хребтову балку, визначені з умови забезпечення міцності при дії експлуатаційних навантажень. В якості рами вагона-прототипу обрано раму напіввагона моделі 12-757. Важливо зазначити, що даний профіль SIN-балки не є типовим. Використання SIN-балок в якості основних несучих елементів рами сприяє зменшенню її маси на 6% у порівнянні з рамою вагона-прототипу.

Для обґрунтування використання SIN-балок в несучих конструкціях напіввагонів побудовано просторову модель рами напіввагона (рис. 2) та проведено розрахунок на міцність. Всі графічні роботи проводилися в програмному комплексі SolidWorks. Розрахунок на міцність здійснений в програмному комплексі SolidWorks Simulation за методом скінчених елементів [9-12].

Оптимальна кількість елементів сітки визначена з використанням графоаналітичного методу [13, 14]. В якості скінчених елементів застосовані ізопараметричні тетраедри. При цьому кількість елементів сітки склала 75360, вузлів – 24045. Максимальний розмір елементу сітки дорівнює 192,7 мм, мінімальний – 38,5 мм, максимальне співвідношення боків елементів – 710,5, відсоток елементів з співвідношенням боків менше трьох – 2,87, більше десяти – 47,3.

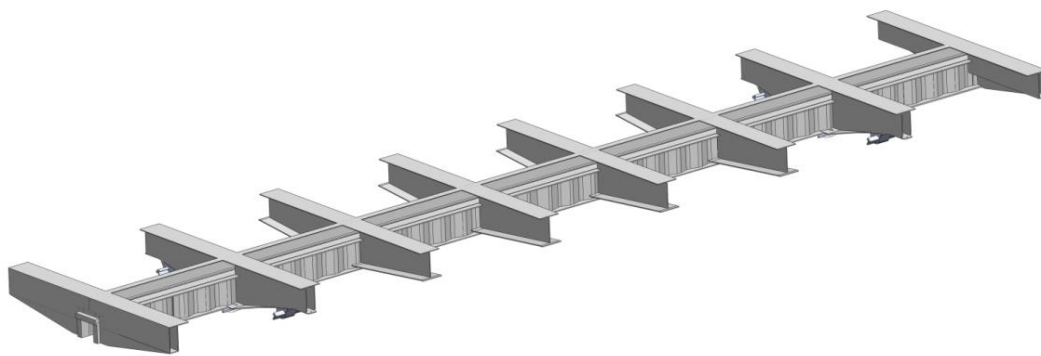


Рис. 2 – Просторова модель рами напіввагона

Розрахункова схема рами напіввагона наведена на рис. 3. Визначення міцності рами напіввагона проведено для I розрахункового режиму – «удар». Враховано, що на раму діє вертикальне статичне навантаження P_{σ}^{cm} з урахуванням використання повної вантажопідйомності вагона, а також повздовжнє навантаження P_n на задній упор автозчепу.

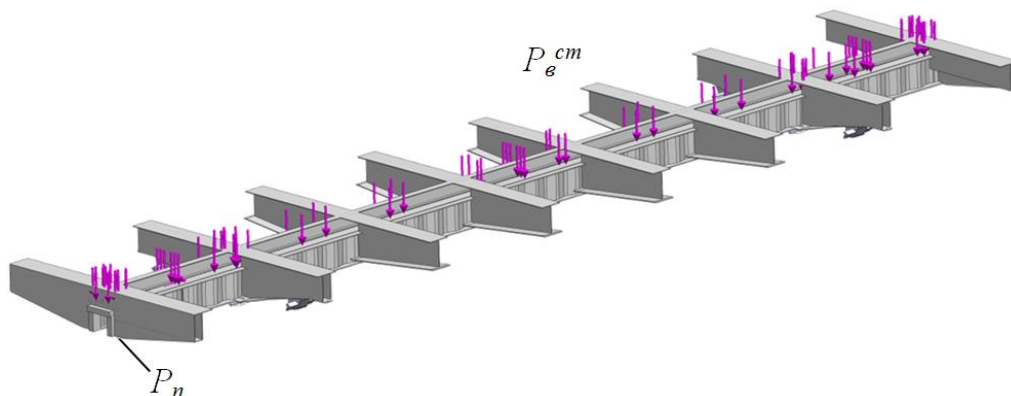


Рис. 3 – Розрахункова схема рами напіввагона

Закріплення моделі здійснювалося в зонах спирання рами на візки. Матеріал конструкції – сталь марки 09Г2С. Результати розрахунку на міцність рами наведені на рис. 4.

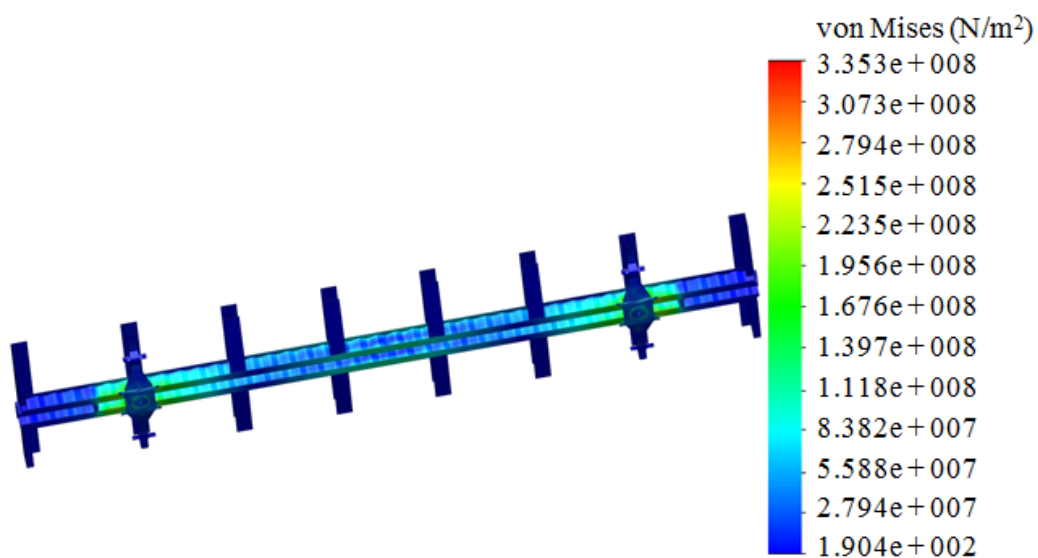


Рис. 4 – Напружений стан рами напіввагона

Максимальні еквівалентні напруження при цьому виникають в зоні взаємодії хребтової балки зі шворневою та складають близько 335,3 МПа і не перевищують допустимі [15, 16]. В середній частині хребтової балки максимальні еквівалентні напруження склали 245 МПа, а у кінцевих балках – близько 130 МПа. Максимальні еквівалентні напруження в проміжних балках зафіксовані в зонах їх взаємодії з хребтовою та дорівнюють 195 МПа. Максимальні переміщення склали близько 29,0 мм та зосереджені в центральній частині рами.

Розрахунок на міцність здійснений і стосовно інших схем навантаження. При цьому показники міцності рами знаходяться в межах допустимих.

Для визначення основних показників динаміки напіввагона з використанням удосконаленої конструкції рами проведено розрахунок. Розрахункова схема наведена на рис. 5.

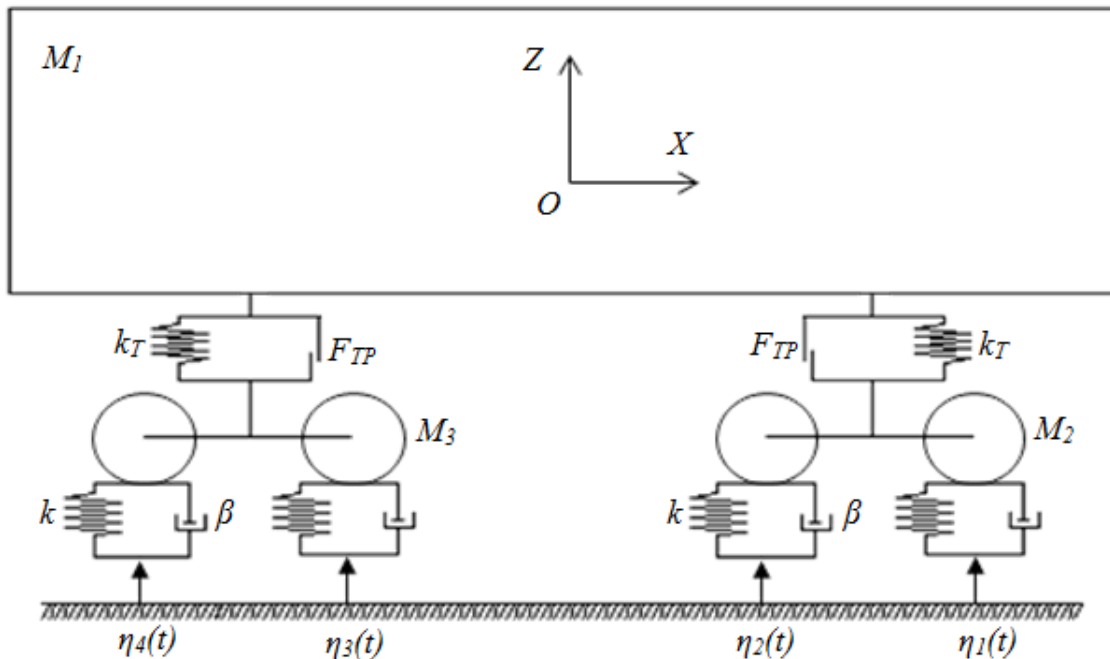


Рис. 5 – Розрахункова схема напіввагона

При цьому використано математичну модель, розроблену проф. Ю.В. Дьомінім та доцентом Г.Ю. Черняк [17]. Розрахунок проведений у плоскій системі координат за умови руху вагона у порожньому стані стиковою нерівністю, як випадку найбільшої навантаженості несучої конструкції. Враховано, що колія має пружно-в'язкі характеристики.

Прийнято припущення, що на систему накладені такі зв'язки:

- переміщення рами і візків вагона уздовж осі колії однакові;
- колісні пари рухаються без проковзування: $\psi_{ij} = x_{ij}/R$, ($i, j = 1, 2$), де R – радіус колеса, 0,475 м;
- через відсутність пружних елементів в буксовому підвішуванні підстрибування візків визначаються підстрибуванням колісних пар.

Рівняння руху розрахункової моделі мають вигляд:

$$M_1 \cdot \frac{d^2}{dt^2} q_1 + C_{1,1} \cdot q_1 + C_{1,3} \cdot q_3 + C_{1,5} \cdot q_5 = F_z; \quad (1)$$

$$M_2 \cdot \frac{d^2}{dt^2} q_2 + C_{2,2} \cdot q_2 + C_{2,3} \cdot q_3 + C_{2,5} \cdot q_5 = F_\varphi; \quad (2)$$

$$M_3 \cdot \frac{d^2}{dt^2} q_3 + C_{3,1} \cdot q_1 + C_{3,2} \cdot q_2 + C_{3,3} \cdot q_3 + B_{3,3} \cdot \frac{d}{dt} q_3 = F_z^{T1}; \quad (3)$$

$$M_4 \cdot \frac{d^2}{dt^2} q_4 + C_{4,4} \cdot q_4 + B_{4,4} \cdot \frac{d}{dt} q_4 = F_{\varphi}^{T1}; \quad (4)$$

$$M_5 \cdot \frac{d^2}{dt^2} q_5 + C_{5,1} \cdot q_1 + C_{5,2} \cdot q_2 + C_{5,5} \cdot q_5 + B_{5,5} \cdot \frac{d}{dt} q_5 = F_z^{T2}; \quad (5)$$

$$M_6 \cdot \frac{d^2}{dt^2} q_6 + C_{6,6} \cdot q_6 + B_{6,6} \cdot \frac{d}{dt} q_6 = F_{\varphi}^{T2}; \quad (6)$$

$$F_z = -F_{TP} \cdot \left(\text{sign} \left(\frac{d}{dt} \delta_1 \right) + \text{sign} \left(\frac{d}{dt} \delta_2 \right) \right); \quad (7)$$

$$F_{\varphi} = F_{TP} \cdot l \cdot \left(\text{sign} \left(\frac{d}{dt} \delta_1 \right) + \text{sign} \left(\frac{d}{dt} \delta_2 \right) \right); \quad (8)$$

$$F_z^{T1} = F_{TP} \cdot \text{sign} \left(\frac{d}{dt} \delta_1 \right) + k_1 (\eta_1 + \eta_2) + \beta_1 \left(\frac{d}{dt} \eta_1 + \frac{d}{dt} \eta_2 \right); \quad (9)$$

$$F_{\varphi}^{T1} = -k_1 (\eta_1 - \eta_2) - \beta_1 \cdot a \cdot \left(\frac{d}{dt} \eta_1 - \frac{d}{dt} \eta_2 \right); \quad (10)$$

$$F_z^{T2} = F_{TP} \cdot \text{sign} \left(\frac{d}{dt} \delta_2 \right) + k_1 (\eta_3 + \eta_4) + \beta_1 \left(\frac{d}{dt} \eta_3 + \frac{d}{dt} \eta_4 \right); \quad (11)$$

$$F_{\varphi}^{T2} = -k_1 \cdot a \cdot (\eta_3 - \eta_4) - \beta_1 \cdot a \cdot \left(\frac{d}{dt} \eta_3 - \frac{d}{dt} \eta_4 \right); \quad (12)$$

де M_1, M_3, M_5 – маса елементів коливальної системи, т; M_2, M_4, M_6 – момент інерції елементів коливальної системи, т·м²; C_{ij} – характеристика пружності елементів коливальної системи; B_{ij} – функція розсіювання; a – половина бази візка, м; l – половина бази вагона, м; q_i – узагальнені координати, що відповідають поступальному та кутовому переміщенням навколо вертикальної вісі, відповідно, кузова вагона, першого та другого візка; k_T – жорсткість ресорного підвішування, кН/м; k_i – жорсткість колії, кН/м; β_i – коефіцієнт демпфірування, кН·с/м; F_{TP} – сила тертя у ресорному комплекті, кН.

Вхідними параметрами моделі є технічні характеристики кузова вагона, ресорного підвішування, а також збудовуючої дії (таблиця). При проведенні розрахунків враховувалися параметри ресорного підвішування візка моделі 18-100.

Таблиця

Вхідні параметри до математичної моделі

Параметр	Розмірність	Значення
M_1	т	12,2
M_2	т·м ²	282
M_3, M_5	т	4,3
M_4, M_6	т·м ²	3,0
l	м	4.86
a	м	0,925
k_T	кН/м	8000
k_1	кН/м	100000
β_1	кН·с/м	200

Розв'язок математичної моделі здійснений в програмному комплексі MathCad за методом Рунге-Кутта. Початкові переміщення та швидкості прийняті рівними нулю [18-20].

Результати розрахунків наведені на рисунках 6, 7.

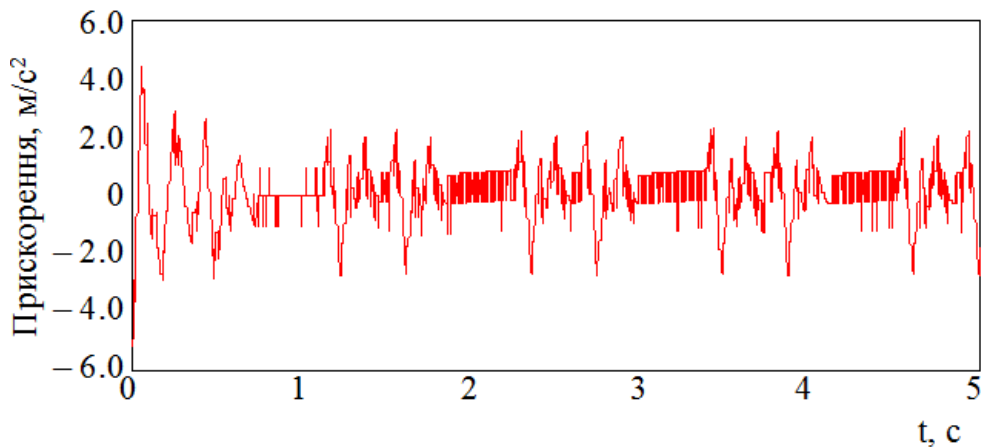


Рис. 6 – Прискорення кузова напіввагона в центрі мас

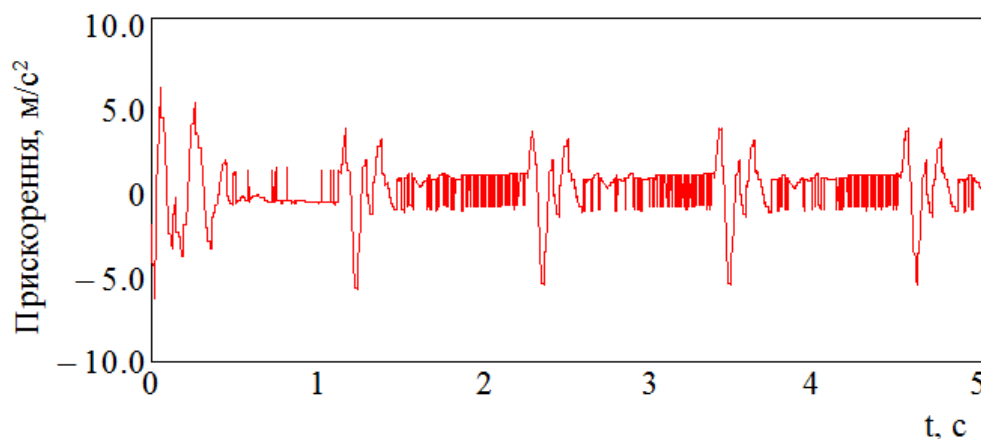


Рис. 7 – Прискорення візків

Максимальні прискорення кузова напіввагона в центрі мас складають $4,8 \text{ м/с}^2$. Прискорення візків дорівнюють $5,7 \text{ м/с}^2$. Сили в ресорному підвішуванні візків склали близько 40 кН , а коефіцієнт вертикальної динаміки – $0,55$.

Проведені розрахунки дозволяють зробити висновок, що всі досліджувані показники динаміки напіввагона знаходяться у допустимих межах. Однак за рахунок того, що маса удосконаленої конструкції напіввагона нижче за масу вагона-прототипу, отримані показники динаміки при русі у порожньому стані дещо знизилися. Але не зважаючи на це, оцінка ходу напіввагона є «відмінною» [15, 16]. Крім того, стає можливим збільшити вантажопідйомність вагона за умови використання повного осьового навантаження колісних пар візків, що сприятиме дотриманню показників динаміки не нижче за ті, що притаманні вагону-прототипу.

Висновки

1. Удосконалено раму напіввагона шляхом впровадження в якості несучих елементів SIN-балок. Геометричні параметри SIN-балок, які утворюють хребтову балку, визначені з умови забезпечення її міцності при дії експлуатаційних навантажень. Важливо зазначити, що профіль виконання SIN-балок не є типовим у відповідності до сортаменту. Використання SIN-балок в якості основних несучих елементів рами сприяє зменшенню її маси на 6% у порівнянні з рамою вагона-прототипу.

2. Проведено розрахунок на міцність рами напіввагона. При цьому використано програм-

ний комплекс SolidWorks Simulation, який реалізує метод скінчених елементів. Максимальні еквівалентні напруження при цьому виникають в зоні взаємодії хребтової балки зі шворневою та складають близько 335,3 МПа і не перевищують допустимі. Максимальні переміщення склали близько 29,0 мм та зосереджені в центральній частині рами.

3. Визначено основні показники динаміки несучої конструкції напіввагона. Максимальні прискорення кузова напіввагона в центрі мас складають 4,8 м/с². Прискорення візків дорівнюють 5,7 м/с². Сили в ресорному підвішуванні візків склали близько 40 кН, а коефіцієнт вертикальної динаміки – 0,55.

Проведені розрахунки дозволяють зробити висновок, що всі досліджувані показники динаміки напіввагона знаходяться у допустимих межах. Оцінка ходу напіввагона є «відмінною».

Подяка

Дані дослідження проведені в рамках наукової теми молодих вчених «Інноваційні засади створення ресурсозберігаючих конструктивів вагонів шляхом урахування уточнених динамічних навантажень та функціонально-адаптивних флеш-концептів», яка виконується за рахунок коштів державного бюджету України з 2020 р.

Перелік використаних джерел:

1. Hecht Markus. Innovative rail freight wagons - A precondition to increase the market-share of rail freight / Markus Hecht // Archives of Transport. – 2015. – Vol. 29 (1). – Pp. 17-26. – Mode of access: <https://doi.org/10.5604/08669546.1146959>.
2. Krasoń Wiesław. Innovative Project of Prototype Railway Wagon and Intermodal Transport System / Wiesław Krasoń, Tadeusz Niezgodą, Michał Stankiewicz // Transportation Research Procedia. – 2016. – Vol. 14. – Pp. 615-624. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.307>.
3. The next generation material for lightweight railway car body structures: Magnesium alloys / Woo Geun Lee, Jung-Seok Kim, Seung-Ju Sun, Jae-Yong Lim // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit. – 2016. – Vol. 232. – Iss. 1. – Pp. 25 – 42. – Mode of access: <https://doi.org/10.1177/0954409716646140>.
4. Improvement of the open wagon for cargoes which imply loading with a «hat» / A. Reidemeister, L. Muradian, V. Shaposhnyk, O. Shykunov, O. Kyryl'chuk, V. Kalashnyk // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 985, 012034. – Pp. 1-7. – Mode of access: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/985/1/012034>.
5. Antipin D.Ya. Justification of a Rational Design of the Pivot Center of the OpenTop Wagon Frame by means of Computer Simulation / D.Ya. Antipin, D.Yu. Racin, S.G. Shorokhov // Procedia Engineering. – 2016. – Vol. 150. – Pp. 150-154. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.738>.
6. Haraka S.S. Structural dynamic analysis of freight railway wagon using finite element method / S.S. Haraka, S.C. Sharma, S.P. Harshaa // Procedia Materials Science. – 2014. – Vol. 6. – Pp. 1891-1898. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2014.07.221>.
7. Fomin O. Improvements in passenger car body for higher stability of train ferry / O. Fomin, A. Lovska // Engineering Science and Technology an International Journal. – 2020. – Vol. 23. – Iss. 6. – Pp. 1455-1465. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2020.08.010>.
8. Lovska Alyona. A new fastener to ensure the reliability of a passenger coach car body on a railway ferry / Alyona Lovska, Oleksij Fomin // Acta Polytechnica. – 2020. – Vol. 60. – Iss. 6. – Pp. 478-485. – Mode of access: <https://doi.org/10.14311/AP.2020.60.0478>.
9. Dynamic load modelling within combined transport trains during transportation on a railway ferry / A. Lovska, O. Fomin, V. Píštěk, P. Kučera // Applied Science. – 2020. – № 10, 5710. – Pp. 1-15. – Mode of access: <https://doi.org/10.3390/app10165710>.
10. Lovska A.O. Computer simulation of wagon body bearing structure dynamics during transportation by train ferry / A.O. Lovska // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2015. – № 3. – Pp. 9-14. – Mode of access: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.43749>.
11. Experimental confirmation of the theory of implementation of the coupled design of center girder of the hopper wagons for iron ore pellets / O. Fomin, I. Kulbovskiy, E. Soroichinska, S. Sapronova, O. Bambura // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – Vol. 5, № 1 (89). –

- Рр. 11-19. – Mode of access: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.109588>.
12. Fomin Oleksij. Establishing patterns in determining the dynamics and strength of a covered freight car, which exhausted its resource / Oleksij Fomin, Alyona Lovska // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2020. – Vol. 6. № 7 (108). – Pp. 21-29. – Mode of access: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.217162>.
 13. Rationalization of cross-sections of the composite reinforced concrete span structure of bridges with a monolithic reinforced concrete roadway slab / G.L. Vatulia, O.V. Lobiak, S.V. Deryzemlia, M.A. Verevicheva, Ye.F. Orel // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2019. – Vol. 664, 012014. – Pp. 1-9. – Mode of access: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/664/1/012014>.
 14. Vatulia G. Optimization of the truss beam. Verification of the calculation results / G. Vatulia, S. Komagorova, M. Pavliuchenkov // *MATEC Web of Conferences*. – 2018. – Vol. 230, 02037. – Pp. 1-8. – Mode of access: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201823002037>.
 15. ДСТУ 7598:2014. Вагони вантажні. Загальні вимоги до розрахунків та проектування нових і модернізованих вагонів колії 1520 мм (несамохідних). – Введ. 2015-07-01. – Київ, 2015. – 162 с.
 16. ГОСТ 33211-2014. Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам. – Введ. 2016-07-01. – М. : Стандартинформ, 2016. – 54 с.
 17. Дьомін Ю.В. Основи динаміки вагонів / Ю.В. Дьомін, Г.Ю. Черняк. – К. : КУЕТТ, 2003. – 269 с.
 18. The concept of the organization of interaction of elements of military radio communication systems / I.O. Romanenko, A.V. Shyshatskyi, R.M. Zhyvotovskiy, S.M. Petruk // *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. – 2017. – № 1. – Pp. 97-100. – Mode of access: <https://doi.org/10.30748/nitps.2017.26.20>.
 19. Calculation of loads on carrying structures of articulated circular-tube wagons equipped with new draft gear concepts / Alyona Lovska, Oleksij Fomin, Pavel Kučera, Václav Píštěk // *Applied Science*. – 2020. – Vol. 10. – 7441. – Pp. 1-11. – Mode of access: <https://doi.org/10.3390/app10217441>.
 20. The improvement of method for the multi-criteria evaluation of the effectiveness of the control of the structure and parameters of interference protection of special-purpose radio communication systems / A. Minochkin, A. Shyshatskyi, V. Hasan, A. Hasan, A. Opalak, A. Hlushko, O. Demchenko, A. Lyashenko, O. Havryliuk, S. Ostapenko // *Technology Audit and Production Reserves*. – 2021. – Vol. 4, № 2 (60). – Pp. 22-27. – Mode of access: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2021.235465>.

References:

1. Hecht Markus. Innovative rail freight wagons – A precondition to increase the market-share of rail freight. *Archives of Transport*, 2015, vol. 29 (1), pp. 17-26. doi: **10.5604/08669546.1146959**.
2. Krasoń Wiesław, Niezgodą Tadeusz, Stankiewicz Michał. Innovative Project of Prototype Railway Wagon and Intermodal Transport System. *Transportation Research Procedia*, 2016, vol. 14, pp. 615-624. doi: **10.1016/j.trpro.2016.05.307**.
3. Woo Geun Lee, Jung-Seok Kim, Seung-Ju Sun, Jae-Yong Lim. The next generation material for lightweight railway car body structures: Magnesium alloys. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 2016, vol. 232, iss. 1, pp. 25-42. doi: **10.1177/0954409716646140**.
4. Reidemeister A., Muradian L., Shaposhnyk V., Shykunov O., Kyryl'chuk O., Kalashnyk V. Improvement of the open wagon for cargoes which imply loading with a «hat». *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 985, 012034, pp. 1-7. doi: **10.1088/1757-899X/985/1/012034**.
5. Antipin D.Ya., Racin D.Yu., Shorokhov S.G. Justification of a Rational Design of the Pivot Center of the OpenTop Wagon Frame by means of Computer Simulation. *Procedia Engineering*, 2016, vol. 150, pp. 150-154. doi: **10.1016/j.proeng.2016.06.738**.
6. Haraka S.S., Sharma S.C., Harshaa S.P. Structural dynamic analysis of freight railway wagon using finite element method. *Procedia Materials Science*, 2014, vol. 6, pp. 1891-1898.

doi: 10.1016/j.mspro.2014.07.221.

7. Fomin O., Lovska A. Improvements in passenger car body for higher stability of train ferry. *Engineering Science and Technology an International Journal*, 2020, vol. 23, issue 6, pp. 1455-1465. doi: 10.1016/j.jestch.2020.08.010.
8. Lovska Alyona, Fomin Oleksij. A new fastener to ensure the reliability of a passenger coach car body on a railway ferry. *Acta Polytechnica*, 2020, vol. 60, iss. 6, pp. 478-485. doi: 10.14311/AP.2020.60.0478.
9. Lovska A., Fomin O., Pištěk V., Kučera P. Dynamic load modelling within combined transport trains during transportation on a railway ferry. *Applied Science*, 2020, no. 10, 5710, pp. 1-15. doi: 10.3390/app10165710.
10. Lovska A.O. Computer simulation of wagon body bearing structure dynamics during transportation by train ferry. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2015, no. 3, pp. 9-14. doi: 10.15587/1729-4061.2015.43749.
11. Fomin O., Kulbovskiy I., Sorochinska E., Sapronova S., Bambura O. Experimental confirmation of the theory of implementation of the coupled design of center girder of the hopper wagons for iron ore pellets. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2017, vol. 5, no. 1 (89), pp. 11-19. doi: 10.15587/1729-4061.2017.109588.
12. Fomin Oleksij, Lovska Alyona. Establishing patterns in determining the dynamics and strength of a covered freight car, which exhausted its resource. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2020, vol. 6, no. 7 (108), pp. 21-29. doi: 10.15587/1729-4061.2020.217162.
13. Vatulia G.L., Lobiak O.V., Deryzemlia S.V., Verevicheva M.A., Orel Ye.F. Rationalization of cross-sections of the composite reinforced concrete span structure of bridges with a monolithic reinforced concrete roadway slab. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 664, 012014, pp. 1-9. doi: 10.1088/1757-899X/664/1/012014.
14. Vatulia G., Komagorova S., Pavliuchenkov M. Optimization of the truss beam. Verification of the calculation results. *MATEC Web of Conferences*, 2018, vol. 230, 02037, pp. 1-8. doi: 10.1051/mateconf/201823002037.
15. DSTU 7598:2014. *Vagoni vantazhni. Zagalni vimogi do rozrahunkiv ta proektuvannya novih i modernizovanih vagoniv kolii 1520 mm (nesamohidnih)* [State standart 7598: 2014. Freight cars. Zagalni vimogi do rozrahunkiv ta proektuvannya new and modernizovanih vagoniv kolii 1520 mm (nesamohidnih)]. Kyiv, 2015. 162 p. (Ukr.)
16. GOST 33211-2014. *Vagony gruzovye. Trebovaniya k prochnosti i dinamicheskim kachestvam* [State standart 33211-2014. Freight cars. Requirements for durability and dynamic qualities]. Moskva: Standartinform, 2016. 54 p. (Rus.)
17. Domin Yu.V., Chernyak G.Yu. *Osnovi dinamiki vagoniv* [Fundamentals of Carriage Dynamics]. Kyiv, KUETT Publ., 2003. 269 p. (Ukr.)
18. Romanenko I.O., Shyshatskyi A.V., Zhyvotovskiy R.M., Petruk S.M. The concept of the organization of interaction of elements of military radio communication systems. *Nauka i tekhnika Povitrianih Sil Zbroinikh Sil Ukraini – Science and Technology of the Air Force of the Armed Forces of Ukraine*, 2017, no. 1, pp. 97-100. doi: 10.30748/nitps.2017.26.20.
19. Alyona Lovska, Oleksij Fomin, Pavel Kučera, Václav Pištěk. Calculation of loads on carrying structures of articulated circular-tube wagons equipped with new draft gear concepts. *Applied Science*, 2020, vol. 10, 7441, pp. 1-11. doi: 10.3390/app10217441.
20. Minochkin A., Shyshatskyi A., Hasan V., Hasan A., Opalak A., Hlushko A., Demchenko O., Lyashenko A., Havryliuk O., Ostapenko S. The improvement of method for the multi-criteria evaluation of the effectiveness of the control of the structure and parameters of interference protection of special-purpose radio communication systems. *Technology Audit and Production Reserves*, 2021, vol. 4, no. 2 (60), pp. 22-27. doi: 10.15587/2706-5448.2021.235465.

Рецензент: С.Ю. Сапронова
д-р техн. наук, проф., ДУІТ

Стаття надійшла 13.03.2021

© Фалендиш А.П.¹, Іванченко Д.А.², Клецька О.В.³,
Кіріцева О.В.⁴, Барібін М.А.⁵, Джус В.С.⁶

МОДЕЛЬ НОРМУВАННЯ ВИТРАТ ЕНЕРГІЇ НА ТЯГУ ЕЛЕКТРОПОЇЗДІВ

У статті розглянуті питання визначення витрати енергоресурсів на тягу поїздів з врахуванням поїзних умов та особливостей тягового рухомого складу. Встановлено критерії оптимальності будь-якої математичної моделі та вимоги до неї. Представлено фізичну суть нормування витрати палива та електроенергії по АТ «Укрзалізниця» в цілому, а також розглянуто на базі локомотивного депо та машиніста зокрема. Проаналізовано методику кривих обмеження діапазону нормування витрат й представлено можливі шляхи вирішення. На базі контролера машиніста, як елементу управління режимами ведення поїзда, розглянуто приклад однорідних дискретних марківських ланцюгів вибору режиму ведення поїзда. Проаналізовано існуючі підходи до розрахунку норм витрат електроенергії на тягу електрорухомого складу та порівняно з поточним станом методики нормування в фактичних депо. Розглянуто вимоги машиністів-інструкторів з теплотехніки (й іншого персоналу з контролю, обробки та корегування) та стан забезпеченості електронно-обчислювальною технікою в депо. На базі розділення витрат на безпосередньо тягу, роботу допоміжних машин та опалення електропоїздів запропоновано математичну модель встановлення величини витрат електроенергії на тягу електропоїздів. Зроблені відповідні висновки в ході дослідження по впровадженню математичного моделювання в вирази, які відображають норми витрат енергоресурсів.

Ключові слова: нормування витрат, тягові розрахунки, енергоресурси, математичне моделювання, тяговий рухомий склад.

A.P. Falendysh, D.A. Ivanchenko, O.V. Kletska, O.V. Kiritseva, M.A. Baribin, V.S. Dzhus. Model of rationing of energy expenses on electric trains traction. The article considers the issues of determining the energy resources consumption for train traction, taking into account the train conditions and features of traction rolling stock. The criteria of optimality of any mathematical model as well as the requirements to it have been established. The physical essence of fuel and electricity consumption rationing at JSC «Ukrzaliznytsia» in general has been presented and considered taking into account the conditions of the work of the locomotive depot and the driver in particular as well. The curves technique of limiting the consumptions rationing range has been analyzed and possible solutions have been presented. Taking into account the Master controller, as an element of control of train driving modes, an example of homogeneous discrete Markov chains of train driving mode selection has been considered. The actual state of electric power consumption rationing has been analysed by the instructors in heat engineering of the motorwagon depot. The absence of initial norms of electric power consumption from the traction-power passports of electric trains has been found out. Taking into account

¹ д-р техн. наук, професор, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, ORCID ID: 0000-0003-3602-7945, far_hiit@ukr.net

² канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, ukrsart.erps@gmail.com

³ канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, ORCID ID: 0000-0002-4682-860X, м. Маріуполь, gurao@ukr.net

⁴ ст. викладач, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, ORCID ID: 0000-0002-2481-5883, evkiritseva@gmail.com

⁵ аспірант, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, ORCID ID: 0000-0002-1397-7852, kanifoli4.92@gmail.com

⁶ канд. техн. наук, доцент, Львівська філія Дніпровського національного університету залізничного транспорту, м. Львів

intensive development of electronic computers and availability of personal computers at the depot a flexible adjustable schedule has been offered, programmable and suitable algorithm for the drivers under operating conditions of analog traction rolling stock. The existing approaches to the calculation of electricity consumption rates for traction of electric rolling stock have been analyzed and compared with the current state of the rationing methodology. The requirements of drivers-instructors in heat engineering (and other personnel for control, processing and adjustment) as well as the availability of electronic and computer equipment at the depot have been considered. Based on the division of expenses for the traction itself, operation of auxiliary machines and heating of electric trains, a mathematical model of establishing the amount of electricity consumption for electric trains traction has been proposed. Relevant conclusions were made at the study on the introduction of mathematical modelling in the expressions that reflect the standards of energy consumption.

Keywords: *expenses rating, traction calculations, energy resources, mathematical modelling, traction rolling stock.*

Постановка проблеми. Паливно-енергетична складова собівартості перевезення вантажів та пасажирів, в умовах зростання цін на енергоресурси на світових ринках, вимагає проведення пильного контролю за фактичним станом використання обсягів споживання. Аналіз складових тягово-енергетичного паспорту, розділення витрат за напрямками експлуатації, раціональне використання тягових властивостей профілю шляху та рухомого складу, оптимізація графіків руху поїздів та методик формування, постійне вивчення вітчизняного та закордонного досвіду експлуатації повинно стати пріоритетним напрямком. Нехтування подібними задачами призводить до збільшення собівартості перевезень залізницею та, як наслідок, зниження конкурентної здатності, втрати вантажо- та пасажировідправників, можливих крадіжок з енергосистеми АТ «Укрзалізниця» та інших факторів. Виявлення, попередження та оптимізація резервів паливно-енергетичних та виробничих ресурсів, можливостей рухомого складу за результатами статистичного аналізу фактичних витрат та розробки на їх основі заходів, які дають змогу підвищити енергоефективність та знизити показники енергоємності залізничної продукції, є основою нормування витрат.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Початок ефективного аналізу розробки рівнянь тягово-енергетичного паспорту будь-якого рухомого складу базується на виконанні тягових розрахунків. Безліч фахівців присвятили свої праці питанням оптимізації, моделюванню та аналізу рівнянь руху поїзда. Серед них слід виділити працю С.І. Осипова [1], в якій сформовані основні підходи обчислення рівнянь руху поїзда та проаналізовано фактори впливу на них. Важливу інформацію зведено в джерело [2], як такого що встановлює основні енергетичні характеристики та питомі сили різних типів рухомого складу. Також слід відмітити роботи Е.Д. Тартаковського, у джерелі [3] якого сформована концепція впливу нормоутворюючих факторів на другому етапі життєвого циклу рухомого складу та пошуку шляхів вибору нового чи існуючого парку для перевезення вантажів. Важливий вклад в пошук раціональних режимів ведення поїзда та взаємодії різних типів рухомого складу для оптимізації витрат на транспортування наведено в працях [4-7]. Вивчення закордонного досвіду в площині мінімізації витрат ресурсів на тягу, математичного моделювання, безперервного моніторингу технічного стану та корегування в ході дослідження фактичних характеристик виконано фахівцями в працях [8-11]. Так, в джерелі [12] враховане питання нелінійного керування тяговими одиницями з врахуванням питань безпеки руху. Автори в [13] розглядають вплив режимізації роботи тягової одиниці та вплив її на надійність, що в умовах зношеного парку АТ «Укрзалізниця» є актуальним питанням. Факторний аналіз характеристик енергоспоживання на базі моделювання електропоїздів виконано в [14]. Проте важливим недоліком закордонних праць є невідповідність типів рухомого складу та особливостей експлуатації локомотивного та моторвагонного парку.

Виконання аналізу поточних документів з нормування витрат паливно-енергетичних ресурсів АТ «Укрзалізниця» показав гостру необхідність в розробці і в провадженні нових методик на заміну старим [15-17], як таким, що не відповідають вимогам ISO 50001 «Системи енергетичного менеджменту». Другою важливою проблемою, яка окреслена в наказах [15-17], є відсутність автоматизації та об'ємність розрахунків для пересічного машиніста-інструктора з теп-

лотехніки чи інженерами-теплотехніками відповідних служб. Вивчення праці [18] вказує готовність всіх рівнів АТ «Укрзалізниці» до впровадження нових підходів з обчислення фактичних норм витрат ресурсів на тягу. Тому вирішенням даної проблеми є розробка на базі існуючих нормоутворюючих коефіцієнтів адаптивної математичної моделі з гнучкою системою корегування нормоутворюючих параметрів.

Мета і завдання дослідження. Розглянути питання визначення витрати енергоресурсів на тягу поїздів з врахуванням поїзних умов та особливостей тягового рухомого складу. Встановити критерії оптимальності будь-якої математичної моделі та вимоги до неї з точки зору нормування ресурсів. Представити фізичну суть та проаналізувати методику нормування витрати палива та електроенергії. Проаналізувати існуючі підходи до розрахунку норм витрат електроенергії на тягу електрорухомого складу та визначити поточний стан методики нормування в моторвагонних депо. Запропонувати гнучку математичну модель встановлення величини витрат електроенергії на тягу електропоїздів.

Виклад основного матеріалу. Розробка математичної моделі визначення витрат енергоресурсів на тягу поїздів базується на моделюванні поїзних умов, особливостей тягового рухомого складу та психо-емоційного стану локомотивних бригад. Критерієм якості будь-якої моделі є отримання достовірних даних, заснованих та підтверджених на методах математичної статистики реальних експлуатаційних обставин, а також доступність і інформативність ресурсу будь-якому члену перевізного процесу та представляти можливість оптимізаційних шляхів раціоналізації при зміні якісних чи об'ємних показників. Візуально для будь-якого типу рухомого складу витрату ресурсів в депо можливо представити у вигляді графіку (рис. 1), який представляє собою залежність витрати електроенергії A (для електрорухомого складу) та палива G (для теплотяги) від пройденого шляху S та затраченого часу t . При цьому з точки зору нормування витрати енергії на тягу зовсім не важливо яким чином машиніст прийшов до точки t_n, S_n на осі абсцис

$$A(t, n_1), G(t, n_1) \vee A(t, n_2), G(t, n_2) \vee A(t, n_3), G(t, n_3) \vee A(t, n_4), G(t, n_4) \vee A(t, n_5), G(t, n_5),$$

тобто комбінація використання позицій контролера машиніста та тривалості його застосування для максимального обмеження $A_{\max}(t=t_n) \Leftrightarrow A_{\max}(S=S_n)$ та $G_{\max}(t=t_n) \Leftrightarrow G_{\max}(S=S_n)$ ролі не грає – головне щоб виконувалися наступні вирази:

$$P(A_{\max}(t=t_n) \Leftrightarrow A_{\max}(S=S_n)) \in B_{III}^{TPC}; \quad (1)$$

$$P(G_{\max}(t=t_n) \Leftrightarrow G_{\max}(S=S_n)) \in B_{III}^{TPC}, \quad (2)$$

де $A_{\max}(t=t_n) \Leftrightarrow A_{\max}(S=S_n)$, $G_{\max}(t=t_n) \Leftrightarrow G_{\max}(S=S_n)$ – відповідно, максимальне обмеження витрати ресурсів на тягу для електро- та теплотяги в момент часу t_n та шляху S_n , [кВт·год] чи [кг]; B_{III}^{TPC} – ймовірність виконання встановленої норми локомотивними бригадами.

Математична суть виразів (1)-(2) полягає у належності ймовірності потрапляння енергетичних результатів поїздки до довірчого інтервалу встановлених норм.

Фізична суть кривої мінімальних значень витрати електроенергії (для електрорухомого складу) та палива (для теплотяги) полягає у оптимальному використанні технічних особливостей рухомого складу та профілю шляху при мінімальних витратах на переміщення поїзда з виконанням графіку руху. При цьому ймовірність знаходження об'єму реальних витрат енергії на тягу при експлуатації стає нескінченно малою величиною, поясненням якого є наявність людського фактору в управлінні експлуатованою одиницею. Вирішенням цього питання може стати впровадження мікропроцесорного управління в режим ведення поїзда:

$$P(A_{\min}(t=t_n) \Leftrightarrow A_{\min}(S=S_n)) \rightarrow 0 \forall A_{\min}(t_n; S_n) \rightarrow \min^E, \quad (3)$$

$$P(G_{\min}(t=t_n) \Leftrightarrow G_{\min}(S=S_n)) \rightarrow 0 \forall G_{\min}(t_n; S_n) \rightarrow \min^T, \quad (4)$$

де $A_{\min}(t_n; S_n)$, $G_{\min}(t_n; S_n)$ – відповідно, витрати електроенергії та палива в момент часу t_n та протягом пройденної відстані S_n , [кВт·год] або [кг]; \min^E , \min^T – відповідно, мінімальні витрати електро- та теплорухомого складу в момент часу t_n та протягом пройденної відстані S_n , [кВт·год] або [кг].

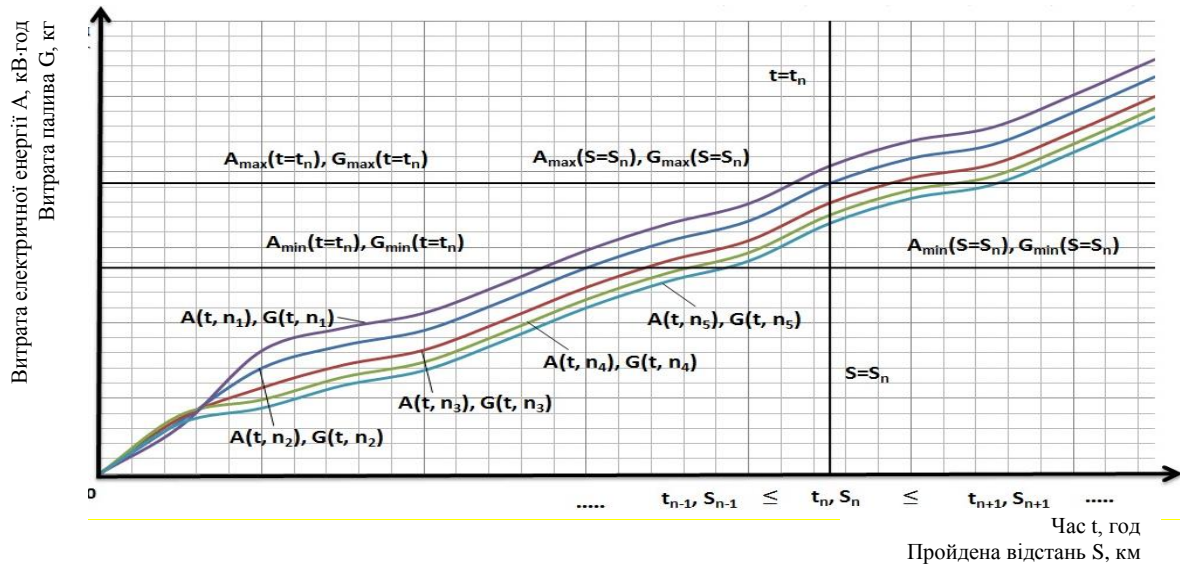


Рис. 1 – Графічне відображення фізичного процесу витрати енергоресурсів різними машиністами при однакових умовах експлуатації

Визначення мінімальних витрат енергії обраного типу експлуатованої одиниці визначається за виразом:

$$\min^E = \int_0^{t_n} U(t) \cdot I(t) dt \text{ або } \min^E = \frac{m \cdot \xi \cdot S_n}{3600} \int_0^{t_n} (f_K(t) - w(t) - b_T(t)) dt; \quad (5)$$

$$\min^T = \int_0^{k_i \cdot t_n} G_T(t) dt + \int_0^{(1-k_i) \cdot t_n} G_{XX}(t) dt \text{ або } \min^T = \frac{m \cdot \xi \cdot S_n \cdot g_e}{3600} \int_0^{t_n} (f_K(t) - w(t) - b_T(t)) dt, \quad (6)$$

де $U(t)$, $I(t)$ – відповідно, функції напруги і струму на струмоприймачі, В та А; $G_T(t)$, $G_{XX}(t)$ – відповідно, функції витрати палива на тягу поїздів та холостому ході, кг; k_i – коефіцієнт відсотку часу витрати палива при тяговому режимі; m – маса поїзда, кг; ξ – коефіцієнт питомого прискорення, $\frac{M/c^2}{H/kH}$; $f_K(t)$, $w(t)$, $b_T(t)$ – відповідно, функції питомих сил тяги, опору руху та гальмівних сил, Н/кН.

Визначення норми на тягу поїздів та як наслідок ймовірності її виконання базується на статистичному дослідженні апроксимованих значень функції рівняння тягово-енергетичного паспорту рухомого складу різними методами, головна вимога до яких – це мінімальні значення середньоквадратичних відхилень екстрапольованих значень отриманих функцій протягом всього життєвого циклу рухомого складу. Схематичне зображення статистичного методу нормування витрат енергоресурсів на тягу наведено на рис. 2.

На базі проведених досліджень працівниками служби Т та НЕР (на рівні залізниць) та департаментами ЦЕР, ЦРП та ЦТ (на рівні АТ «Укрзалізниця») узгоджуються відповідні величини норм; при цьому ймовірність виконання норми може як максимізуватися, так і мати досить не велику ймовірність, і буде визначатись за виразом:

$$B_{III}^{TPC} = \frac{n_{BIII}}{n_{III}}, \quad (7)$$

де n_{BIII} – штатна кількість працівників, які можуть виконати норму на відповідному типі рухомого складу, чол.; n_{III} – штатна кількість працівників, які задіяні в експлуатації відповідного типу рухомого складу, чол.

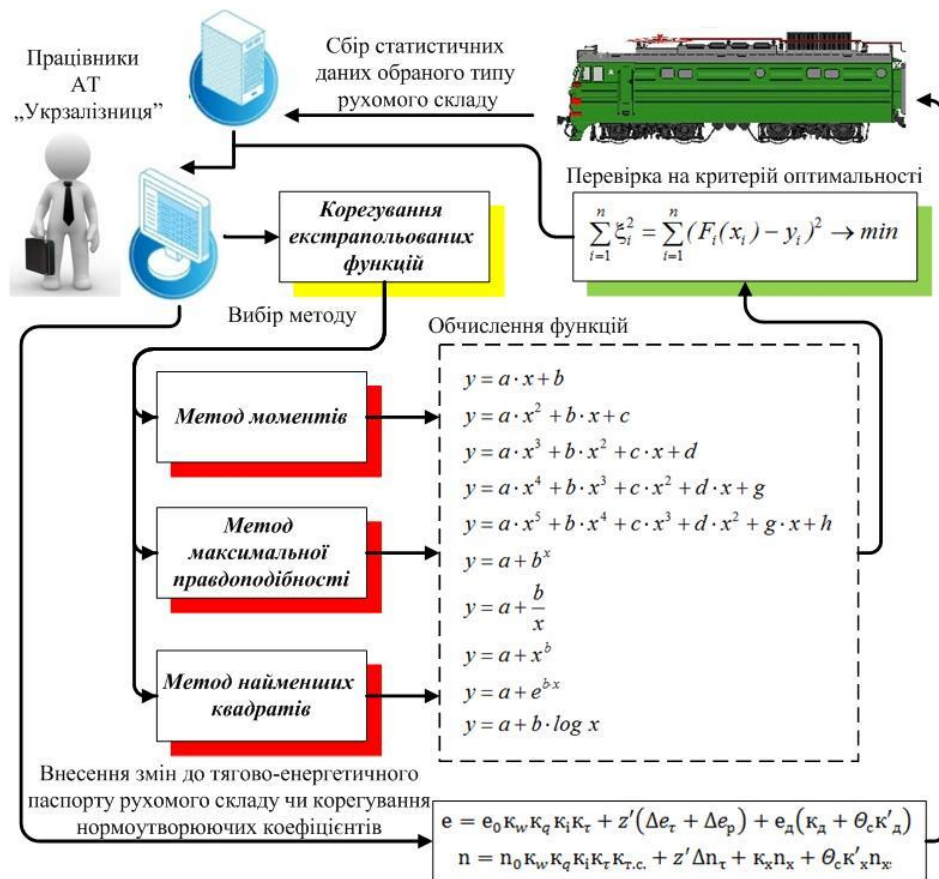


Рис. 2 – Схематичне зображення корегування норм витрат енергоресурсів на тягу та тягово-енергетичного паспорту рухомого складу

Розгляд контролера машиніста, як елементу управління режимами ведення поїзда, має в собі приклад однорідних дискретних марківських ланцюгів, графічне зображення якого наведено на рис. 3.

Матриця перехідних ймовірностей даного графу буде мати вид:

$$P = \begin{bmatrix} P_0 & P_{01}^T & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & P_{01}^\Gamma & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ P_{10}^T & P_1^T & P_{12}^T & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & P_{21}^T & P_2^T & P_{23}^T & & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & P_{32}^T & P_3^T & P_{34}^T & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & P_{43}^T & P_4^T & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & P_n^T & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ P_{10}^\Gamma & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & P_1^\Gamma & P_{12}^\Gamma & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & P_{21}^\Gamma & P_2^\Gamma & P_{23}^\Gamma & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & P_{32}^\Gamma & P_3^\Gamma & P_{34}^\Gamma & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & P_{43}^\Gamma & P_4^\Gamma & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & P_m^\Gamma \end{bmatrix}, \quad (8)$$

де $P_0, P_{01}^T, \dots, P_m^\Gamma$ – ймовірності знаходження контролера машиніста в відповідному стані.

При чому сума ймовірностей знаходження в одному з станів визначається рівністю:

$$\sum_{j=1}^k P_{ij} = 1, \quad (9)$$

де k – кількість стовбців матриці перехідних станів; P_{ij} – величини ймовірностей.

Матриця перехідних ймовірностей даного графу буде мати вид:

$$P = \begin{bmatrix} P_0 & P_{01}^T & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & P_{01}^{\Gamma} & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ P_{10}^T & P_1^T & P_{12}^T & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & P_{21}^T & P_2^T & P_{23}^T & & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & P_{32}^T & P_3^T & P_{34}^T & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & P_{43}^T & P_4^T & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & P_n^T & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ P_{10}^{\Gamma} & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & P_1^{\Gamma} & P_{12}^{\Gamma} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & P_{21}^{\Gamma} & P_2^{\Gamma} & P_{23}^{\Gamma} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & P_{32}^{\Gamma} & P_3^{\Gamma} & P_{34}^{\Gamma} & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & P_{43}^{\Gamma} & P_4^{\Gamma} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & P_m^{\Gamma} \end{bmatrix}, \quad (8)$$

де $P_0, P_{01}^T \dots P_m^{\Gamma}$ – ймовірності знаходження контролера машиніста в відповідному стані.

При чому сума ймовірностей знаходження в одному з станів визначається рівністю:

$$\sum_{j=1}^k P_{ij} = 1, \quad (9)$$

де k – кількість стовбців матриці перехідних станів; P_{ij} – величини ймовірностей.

Вирішення виразів (5)-(6) та як наслідок отримання достовірних значень для складових (8)-(9) важка задача, проте вона виконана та представлена в праці [4]. Однак суть нормування витрати енергоресурсів це встановлення максимальної планки, але такої, яка б задовольняла умові виразу (7) на базі реальних статистичних значень. Існуючий підхід розрахунку норми витрат електричної енергії для електрорухомого складу згідно [1, 15-17] виконують за виразом:

$$e = e_0 \cdot K_w \cdot K_q \cdot K_i \cdot K_r + z' \cdot (\Delta e_r + \Delta e_p) + e_d \cdot (K_d + \Theta_c \cdot K'_d), \quad (10)$$

де e_0 – вихідні норми витрат електроенергії, які визначаються тягово-енергетичним паспортом електропоїзда, кВт·год/10 тис. т.км.бр; K_w – коефіцієнт, який враховує зміну опору поїзда в залежності від особливостей його формування; K_q – коефіцієнт впливу ступеня використання вантажопідйомності вагонів (в даному випадку відношення статичного навантаження на вісь до 17,5 т); K_i – коефіцієнт складності нормованої дільниці; K_r – температурний коефіцієнт нормованого періоду; z' – кількість зупинок, які передбачені графіком руху поїздів на 100 поїздо-км; Δe_r – витрати електроенергії та палива на відновлення кінетичної енергії, втраченої при гальмуванні, кВт·год/10 тис. т.км.бр; Δe_p – витрати електроенергії для електровозів постійного струму в реостатах при рушанні та розгоні, кВт·год/10 тис. т.км.бр; e_d – витрати електроенергії на допоміжні машини локомотива, кВт·год/10 тис. т.км.бр; K_d, K'_d – відповідно, коефіцієнти використання потужності допоміжних машин електровоза в ході та на стоянках, отриманих як частина номінальної потужності, фактично використаної для обслуговування локомотивів; Θ_c – коефіцієнт стояночного часу як відношення часу зупинок, передбачених розкладом руху, до загального часу руху поїзда.

Аналізуючи фактичний стан нормування витрати електроенергії машиністами-інструкторами з теплотехніки моторвагонних депо виявили відсутність вихідних норм витрати електроенергії з тягово-енергетичних паспортів електропоїздів, застосування в якості норм виконувалось на базі даних з контрольно-інструкторських поїздок. Враховуючи інтенсивний розвиток електронно-обчислювальної техніки та повної забезпеченості депо персональними комп'ютерами, необхідно було запропонувати гнучкий (система зображена на рис. 2), корегуємий (графік зображений на рис. 1), програмуємий (як вимога полегшення праці співробітників АТ «Укрзалізниця») та волелюбний (як такий, що залишає свободу дій та протирічить вирішенню графу, зображеному на рис. 3, машиністам при експлуатації аналогового тягового рухомого складу й представляти можливість вибору шляхів раціоналізації) алгоритм.

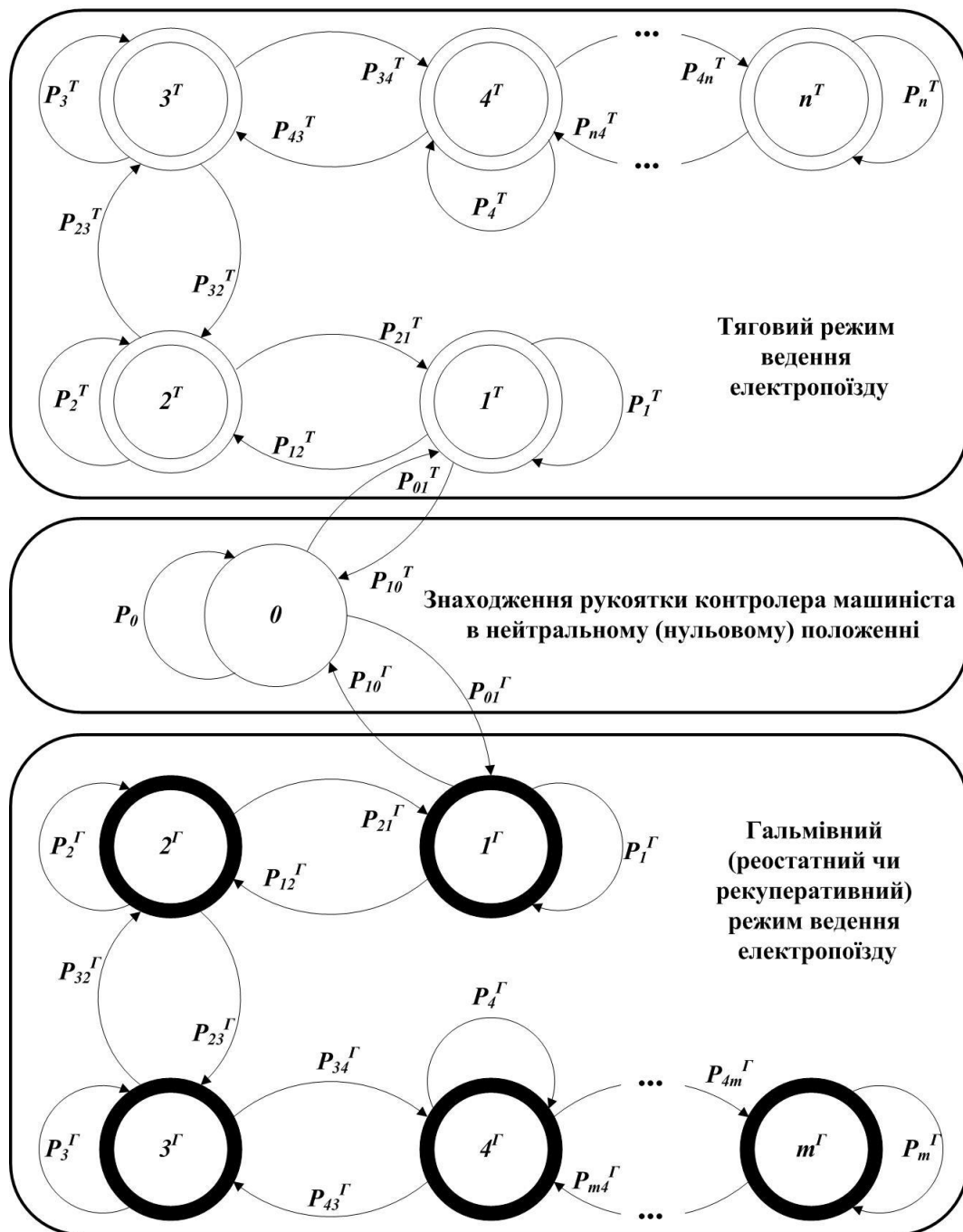


Рис. 3 – Аналітичне представлення режимів роботи тягового рухомого складу у вигляді графу однорідних дискретних марківських ланцюгів

Використовуючи накопичений досвід та проаналізувавши складові виразу (10), витрату електричної енергії для електропоїздів визначаємо за виразом:

$$A = A_T + A_D + A_{оп}, \quad (11)$$

де A_T – витрата електричної енергії безпосередньо на тягу, кВт·год; A_D – витрата електричної енергії на роботу допоміжних машин, кВт·год; $A_{оп}$ – витрата електричної енергії на опалення поїзду, кВт·год.

Витрату електричної енергії безпосередньо на тягу визначаємо за виразом:

$$A_T = \frac{k_H \cdot (S \cdot a' + n_3 \cdot k_3 \cdot P_{зч}) \cdot (S + n_3 + \Delta n_3)}{t}, \quad (12)$$

де k_H – коефіцієнт заповнення вагонів пасажирами (для малонаселених поїздів – 0,95; середньозаселених – 1 та сильнозаселених – 1,05); S – відстань від пункту відправлення до кінцевого призначення, км; k_3 – коефіцієнт жорсткості розгінних процесів, $k_3 = 0.05583$ (у випадку складних або легких умов розгону допускається його корегування в інтервалі 0.07444...0.04188); $P_{зч}$ – зчпна вага сформованого електропоїзду, т; n_3 – кількість зупинок (сума проміжних та кінцевої) на шляху прямування електропоїзду від пункту відправлення до пункту призначення, шт.; Δn_3 – час понаднормового простою (у випадку тривалості зупинки понад 1 хвилину), хв; t – час на подолання відстані від пункту відправлення до кінцевого призначення, хв; a' – середньозважена витрата електричної енергії на проходження 1 кілометра шляху, визначаємо за виразом:

$$a' = \frac{(P_{зч} + 10 \cdot n_e) \cdot \xi \cdot 0.278 \cdot \varpi}{k_{эф}} \cdot (-0.0043 \cdot t^0 + 1.0648) \cdot k_i, \quad (13)$$

де n_e – кількість вагонів у складі електропоїзду, шт.; ξ – коефіцієнт питомого прискорення, для електропоїздів рекомендується приймати $\xi = 0.00918 \frac{м/с^2}{Н/кН}$ (при незадовільному технічному стані допускається збільшення вказаної величини до $\xi = 0.00926 \frac{м/с^2}{Н/кН}$); ϖ – питомі сили опору руху відповідного типу рухомого складу (згідно ПТР) на відповідному типу колії (стикова чи безстикова) в режимі тяги зі швидкістю V , Н/кН; $k_{эф}$ – середньозважений коефіцієнт корисної дії електропоїзду на обраному плечі обслуговування, рекомендується приймати для електропоїздів серії ЕД і ЕПЛ $k_{эф} = 0.574$, для електропоїздів серії ЕР $k_{эф} = 0.564$, проте у випадку складних або легких умов експлуатації допускається його корегування в межах не більше ± 0.15 ; $-0.0043 \cdot t^0 + 1.0648$ – вираз, який враховує вплив температурних умов; t^0 – температура оточуючого середовища, °С; k_i – коефіцієнт важкості профілю.

Для електропоїздів коефіцієнт важкості профілю k_i буде визначатись виразом:

$$k_i = 1 + (10^{-5} \cdot [0.054 \cdot V^3 - 9.5 \cdot V^2 + 233 \cdot V] + 0.343) \cdot (i_e - \Delta i_i), \quad (14)$$

де V – швидкість руху без врахування часу понаднормованого простою, км/год; i_e – еквівалентний ухил (вираз для визначення якого приведено у []), %; Δi_i – величина відносної роботи сил інерції поїзда, %.

Для електропоїздів величину відносної роботи сил інерції поїзда Δi_i , окрім випадків негативного еквівалентного підйому i_e (в цьому випадку величину відносної роботи сил інерції поїзда Δi_i в розрахунок не приймають), визначаємо виразом:

$$\Delta i_i = 0.0027 \cdot i_e^3 - 0.0615 \cdot i_e^2 + 0.0914 \cdot i_e + 0.1944, \quad (15)$$

В ході експлуатації моторвагонного рухомого складу відбувається робота допоміжних машин (основний перелік яких зображено на рис. 4), направлених на функціонування тягового рухомого складу, витрату електричної енергії на роботу яких визначаємо за виразом:

$$A_{д} = \frac{P_{зч} \cdot S \cdot k_{стр} \cdot (0.003 \cdot V_{ср}^2 - 0.5429 \cdot V_{ср} + 29.957)}{10000}, \quad (16)$$

де $V_{ср}$ – середня швидкість руху (відношення пройденого шляху до затраченого часу), км/год; $k_{стр}$ – коефіцієнт роду струму; для електропоїздів постійного струму рекомендується приймати $k_{стр} = 1$, для змінного – $k_{стр} = 1.86$.



Рис. 4 – Основні допоміжні машини електропоїздів різних видів струму

Вірність виразу (16) підтверджується табличними виразами [15] з похибкою у 0,57% та в джерелі [1], величиною похибки пропонується знехтувати в силу специфіки інтерполяційного процесу табличних видів та явною зручністю застосування формульного виразу.

Аналіз втрат тепла в опалювальний період та вимоги до комфортного перевезення пасажирів викликають необхідність встановлення норми витрати електроенергії для локомотивних бригад в певних кліматичних умовах. Теплотехнічний розрахунок кількості енергії, яку необхідно компенсувати опалювальними приладами, визначається за виразом:

$$Q = k \cdot F_1 \cdot (t_{зов} - t_{вн}) + \frac{k \cdot F \cdot A \cdot q}{\alpha} + 0.3 \cdot k \cdot F_1 \cdot (t_{зов} - t_{вн}) + \frac{n_K \cdot V_{нов}}{3.6} \cdot [1.3 \cdot (t_{зов} - t_{вн}) + r \cdot (\phi_1 - \phi_2)] + 1000 \cdot N \cdot n_{ов} \cdot (1 - \eta) \cdot \frac{\tau}{24} + \frac{q_{нас} \cdot Q_{нас}}{3.6 \cdot 10000}, \quad (17)$$

де k – коефіцієнт теплопередачі кузова вагона електропоїзда, $\frac{Вт}{м^2 \cdot К}$; F_1, F – відповідно, площа кузова вагонів електропоїзда та поверхні, яка освітлена сонцем, $м^2$; $t_{зов}, t_{вн}$ – відповідно, температура зовнішнього та повітря пасажирського салону, [К] чи [°С]; A – коефіцієнт поглинання сонячної енергії; q – середньодобова інтенсивність сонячного опромінення, $\frac{Вт}{м^2 \cdot К}$; α –

коефіцієнт віддзеркалення тепла зовнішньої поверхні кузова електропоїзда, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$; 0.3 – коефіцієнт нещільності вікон та дверей (рекомендується – 0.2); n_k – кратність вентиляції об’єму салону, об’ємів/год; $V_{нов}$ – об’єм салону пасажирського вагона електропоїзда, м^3 ; r – прихована теплота пароутворення, кДж/кг ; ϕ_1, ϕ_2 – відповідно, відносна вологість зовнішнього та повітря пасажирського салону, %; N – середня потужність електродвигуна системи вентиляції, кВт ; $n_{об}$ – кількість електродвигунів системи вентиляції, шт.; η – середній коефіцієнт корисної дії електродвигунів системи вентиляції; τ – час роботи вентиляторів системи вентиляції, год; $Q_{нас}$ – кількість пасажирів, люд.; $q_{нас}$ – біологічне тепло в результаті життєдіяльності людини, Вт/люд.

Підвищене значення коефіцієнту 0.3 в виразі (17) обумовлене тепловізійним обстеженням технічного стану (зображеним на рис. 5) та низькою культурою пасажирів (непритискання дверей до повного закриття та сходження гумових ущільнювачів).

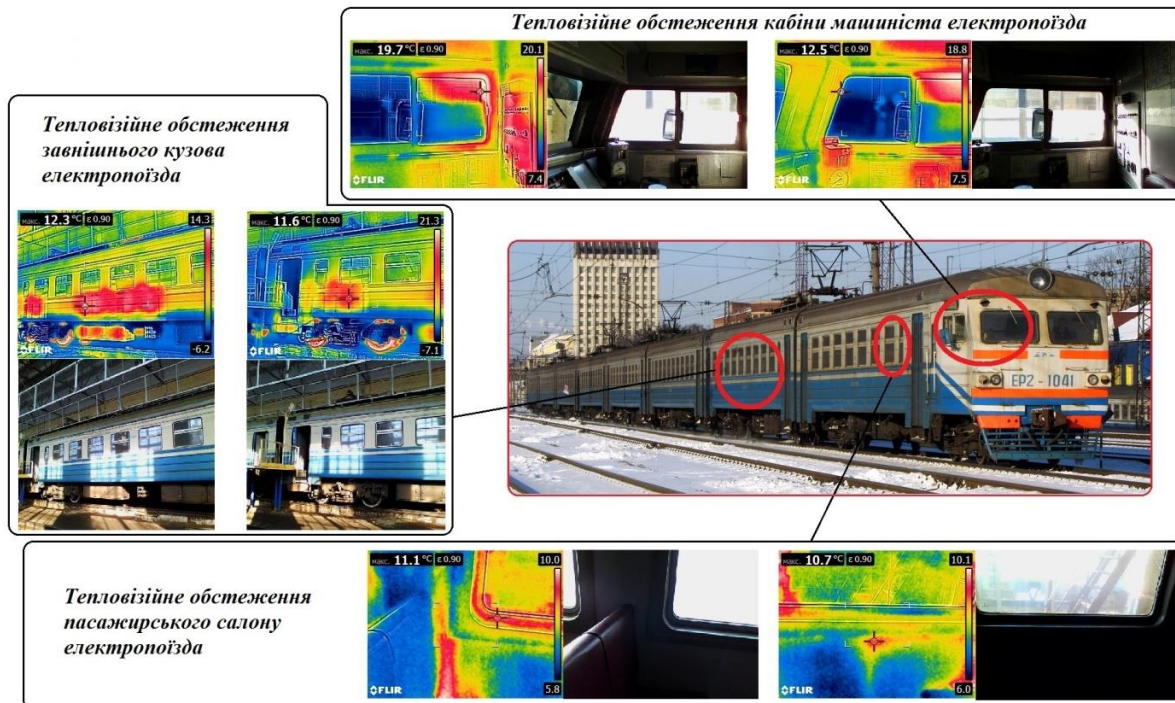


Рис. 5 – Тепловізійне обстеження електропоїзда EP2 в інфрачервоному спектрі

Оскільки використання виразу (17) в практичних розрахунках не є оптимальним, було запропоновано обчислювати витрату електричної енергії на опалення поїзду (для неопалювального періоду приймати рівним 0) за виразом:

$$A_{оп} = \frac{S \cdot P_{зч} \cdot n_g \cdot (-9.1615 \cdot t^0 + 139.13)}{10000 \cdot V_{cp}} \quad (18)$$

При цьому однотипність виразу для різних видів рухомого складу пояснюється однаковою товщиною стандартного теплоізоляційного матеріалу кузовів вагонів та джерелами інформації [1, 15-17]. Похибка розрахунків за виразом (18) в порівнянні з табличним варіантом [15] склала 0.8%, проте розрахунки виконувати стало простіше.

Практична апробація математичної моделі визначення витрат електроенергії на тягу електропоїздів здійснювалась на базі моторвагонного депо РПЧ-1 на плечі обслуговування Харків-Козача Лопань. Так, для середньозавантаженого електропоїзда EP2 у складі 2 головних вагонів, 3 причіпних та 5 моторних на плечі обслуговування Харків-Козача Лопань (відстань 40,3 км, тип колії безстиківий, час подолання відстані згідно графіку руху 1 година 3 хвилини,

еквівалентний ухил 1.335‰), кількість проміжних зупинок на шляху прямування 11 (час понаднормового простою по платформі Лозовеньки – 1.5 хв та на станції Слатине – 1.5 хв) та температури повітря -25°C норма складе 750.17 кВт·год. При цьому поточне нормування електроенергії на базі контрольно-інструкторських поїздок встановлює величину 700 кВт·год. Поясненням збільшеної норми, згідно запропонованої математичної моделі, є необхідність встановлення реальних значень коефіцієнту жорсткості розгінних процесів k_z та середньозваженого коефіцієнту корисної дії електропоїзду k_{ef} на обраному плечі обслуговування, оскільки запропоновані величини (діапазони корегування яких задані вище) можуть мати відмінність через різні умови експлуатації.

Висновки

В результаті аналізу проведеної роботи розглянуто питання визначення витрати енерго-ресурсів на тягу поїздів з врахуванням поїзних умов та особливостей тягового рухомого складу. Встановлено критерії оптимальності будь-якої математичної моделі та вимоги до неї з точки зору нормування ресурсів. Представлено фізичну суть та зроблений аналіз методики нормування витрати палива та електроенергії. На основі аналізу існуючих підходів до розрахунку норм витрат електроенергії на тягу електрорухомого складу визначено поточний стан методики нормування в моторвагонних депо. Запропоновано гнучку математичну модель встановлення величини витрат електроенергії на тягу електропоїздів. В подальшому доцільно впровадити математичне моделювання та перевести запропоновану модель в програмний продукт й запровадити в локомотивне господарство з метою встановлення раціональних норм на ведення поїзда, пошуку зниження ресурсів на тягу та масової практичної апробації.

Перелік використаних джерел:

1. Осипов С.И. Основы тяги поездов. Учебник для студентов техникумов и колледжей железнодорожного транспорта / С.И. Осипов, С.С. Осипов. – М. : УМК МПС России, 2010. – 592 с.
2. Приказ №867р. Правила тяговых расчетов для поездной работы. – Утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 12.05.2016 р. – М., 2016. – 510 с.
3. Оценка жизненного цикла / Э.Д. Тартаковский, А.П. Фалендыш, Ю.Е. Калабухин, С.Г. Грищенко // Локомотив-информ: научный журнал. – 2013. – № 2 (80). – С. 56-60.
4. Determination of rational locomotive operating modes and resource costs based on information from global positioning systems / M. Barybin, A. Falendysh, V. Hatchenko, O. Kletska, E. Kiritseva // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering International Scientific Conference Energy Efficiency in Transport (EET 2020). – 2021. – Vol. 1021. – Pp. 1-8. – Mode of access: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1021/1/012011>.
5. Системи глобального позиціонування в тягових розрахунках з розрахуванням зносу колісних пар рухомого складу / М.А. Барибін, А.П. Фалендиш, В.О. Гатченко, О.В. Клецька, О.В. Кіріцева // Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту. – Х. : УкрДУЗТ, 2020. – Вип. 191. – С. 53-63. – Mode of access: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.191.2020.217294>.
6. Інформаційно-розрахунковий комплекс «Тягові розрахунки» та математичні методи пошуку основних параметрів руху поїзда як основи оптимізації витрат ресурсів на тягу [Текст] / М.А. Барибін, А.П. Фалендиш, В.О. Гатченко, О.В. Клецька, О.В. Кіріцева // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2020. – № 4. – С. 15-27. – Mode of access: <https://doi.org/10.18664/iksz.v25i4.219530>.
7. Модель визначення характеристик режимних карт ведення поїзда / М.А. Барибін, А.П. Фалендиш, В.О. Гатченко, О.В. Клецька, О.В. Кіріцева // Збірник наукових праць ДУІТ. – К. : ДУІТ, 2020. – Вип. 36. – С. 132-142. – (Серія: Транспортні системи і технології).
8. Online condition monitoring of onboard traction transformer core based on core-loss calculation model / Q. Fu, J. Zhu, Z. Mao, G. Zhang, T. Chen // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2018. – Vol. 65 (4). – Pp. 3499-3508. – Mode of access: <https://doi.org/10.1109/TIE.2017.2758721>.
9. Safna F. Artificial Neural Network Based Data Mining / F. Safna, R. Sunny // International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology. – 2015. – Vol. 5 (4). – Pp. 240-245.

10. Neuro-adaptive faulttolerant control of high speed trains under traction-braking failures using self-structuring neural networks / R.Z. Gao, Y.J. Wang, J.F. Lai, H. Gao // *Information Sciences*. – 2016. – Vol. 367. – Pp. 449-462. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.ins.2016.05.033>.
11. Uyulan C. Readhesion control strategy based on the optimal slip velocity seeking method / C. Uyulan, M. Gokasan, S. Bogosyan // *Journal of Modern Transportation*. – 2018. – Vol. 26 (1). – Pp. 36-48. – Mode of access: <https://doi.org/10.1007/s40534-018-0158-x>.
12. Nonlinear MPC-based slip control for electric vehicles with vehicle safety constraints / L. Yuan, H. Zhao, H. Chen, B. Ren // *Mechatronics*. – 2016. – Vol. 38. – Pp. 1-15. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2016.05.006>.
13. Song H. Evaluating Fault Tree by means of Colored Petri nets to analyze the railway system dependability / H. Song, E. Schnieder // *Safety Science*. – 2018. – Vol. 110. – Pp. 313-323. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2018.08.017>.
14. Wang M. Analysis of energy consumption characteristics based on simulation and traction calculation model for the CRH electric motor train units / M. Wang, B. Kou, X. Zhao // *21st International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*. – 2018. – Pp. 2738-2743. – Mode of access: <https://doi.org/10.23919/ICEMS.2018.8549182>.
15. Наказ №062-Ц. Інструкція по технічному нормуванню витрат електричної енергії і палива локомотивами на тягу поїздів (ЦТ-0059). – Введ. 2003-03-05. – Київ, 2003. – 85 с.
16. Наказ №206-ЦЗ. Правила тягових розрахунків для поїзної роботи по електровозах ЧС7, ЧС8, ДЕ1, ДС3, 2ЕЛ5, 2ЕЕС5К, тепловозах ТЕП150, ТЕМ103, дизель-поїздах ДЕЛ-02, електропоїздах ЕПЛ2Т, ЕПЛ9Т (ЦТ-0199). – Введ. 2010-12-22. – Київ, 2010. – 78 с.
17. Наказ №113-Ц. Методика розрахунку норм витрат дизельного палива і електроенергії на тягу поїздів (ЦТ-0099). – Введ. 2004-06-09. – Київ, 2004. – 62 с.
18. Наказ №204-Ц. Положення про інспекцію з контролю ефективності використання енергоресурсів Укрзалізниці. – Введ. 2014-05-16. – Київ, 2014. – 10 с.

References:

1. Osipov S.I., Osipov S.S. *Osnovy tyagi poyezdov* [Principles of traction]. Moscow, UMK MPS Rossii Publ., 2010. 592 p. (Rus.)
2. *Prikaz №867r. Pravila tyagovykh raschetov dlya poyezdnoy raboty* [Order 867. Rules for traction calculations for train work]. Moscow, 2016. 510 p. (Rus.)
3. Tartakovsky, E.D., Falendysh, A.P., Kalabukhin, Y.E., Grishchenko, S.G. (2013). Otsenka zhiznennogo tsikla [Life cycle assessment]. *Lokomotiv-inform: nauchnyy zhurnal – Lokomotiv-inform: a scientific journal*, 2013, no. 2 (80), pp. 56-60. (Rus.)
4. Barybin M., Falendysh A., Hachenko V., Kletska O., Kiritseva E. Determination of rational locomotive operating modes and resource costs based on information from global positioning systems. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering International Scientific Conference Energy Efficiency in Transport (EET 2020)*, 2021, vol. 1021, pp. 1-8. doi: 10.1088/1757-899X/1021/1/012011.
5. Barybin M.A., Falendysh A.P., Hachenko V.O., Klets'ka O.V., Kiritseva O.V. Systemy hlobal'noho pozytsionuvannya v tyahovykh rozrakhunkakh z rozrakhuvannyam znosu kolisnykh par rukhomoho skladu [Systems of global positioning in traction rods with rozrakhuvannya wear of wheel pairs of a collapsed warehouse]. *Zbirnyk naukovikh prats' Ukraïns'kogo derzhavnogo universitetu zaliznichnogo transportu – Collected scientific works of Ukrainian State University of Railway Transport*, 2020, vol. 191, pp. 53-63. doi: 10.18664/1994-7852.191.2020.217294. (Ukr.)
6. Barybin M.A., Falendysh A.P., Hachenko V.O., Klets'ka O.V., Kiritseva O.V. Informatyino-rozrakhunkovyy kompleks «Tyahovi rozrakhunky» ta matematychni metody poshuku osnovnykh parametriv rukhu poyizda yak osnovy optymizatsiyi vytrat resursiv na tyahu [Information and calculation complex «Traction calculations» and mathematical methods for finding the basic parameters of train movement as a basis for optimizing the cost of traction resources]. *Informatyino-keruyuchi systemy na zaliznychnomu transporti – Information and control systems at railway transport*, 2020, no. 4, pp.15-27. doi: 10.18664/ikszt.v25i4.219530. (Ukr.)
7. Barybin M.A., Falendysh A.P., Hachenko V.O., Klets'ka O.V., Kiritseva O.V. Model' vyznachennya kharakterystyk rezhymnykh kart vedennya poyizda [Model of determining the characteristics of the regime maps of the train]. *Zbirnyk naukovykh prats' DUIT. Seriya*

- «Transportni systemy i tekhnolohiyi» – Collection of scientific works of DUIT. Series «Transport systems and technologies», 2020, vol. 36, pp.132-142. (Ukr.)
8. Fu Q., Zhu J., Mao Z., Zhang G., Chen T. Online condition monitoring of onboard traction transformer core based on core-loss calculation model. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018, vol. 65 (4), pp. 3499-3508. doi: **10.1109/TIE.2017.2758721**.
 9. Safna F., Sunny R. Artificial Neural Network Based Data Mining. *International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology*, 2015, vol. 5 (4), pp. 240-245.
 10. Gao R.Z., Wang Y.J., Lai J.F., Gao H. Neuro-adaptive faulttolerant control of high speed trains under traction-braking failures using self-structuring neural networks. *Information Sciences*, 2016, vol. 367, pp. 449-462. doi: **10.1016/j.ins.2016.05.033**.
 11. Uyulan C., Gokasan M., Bogosyan S. Readhesion control strategy based on the optimal slip velocity seeking method. *Journal of Modern Transportation*, 2018, vol. 26 (1), pp. 36-48. doi: **10.1007/s40534-018-0158-x**.
 12. Yuan L., Zhao H., Chen H., Ren B. Nonlinear MPC-based slip control for electric vehicles with vehicle safety constraints. *Mechatronics*, 2016, vol. 38, pp. 1-15. doi: **j.mechatronics.2016.05.006**.
 13. Songs H., Schnieder E. Evaluating the Fence Tree to analyze the railway system dependability. *Safety Science*, 2018, vol. 110, pp. 313-323. doi: **10.1016/j.ssci.2018.08.017**.
 14. Wang M., Kou B., Zhao X. Analysis of energy consumption characteristics based on simulation and traction calculation model for the crh electric motor train units. *21st International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, 2018, pp. 2738-2743. doi: **10.23919/ICEMS.2018.8549182**.
 15. *Nakaz №062-Ts. Instrukciya po tehničnomu normuvannyu vitrat elektrichnoyi energiyi i paliva lokomotivami na tyagu poyizdiv (CT-0059)* [Order №062-C. Instruction on technical standardization of expenses of electric energy and fuel by locomotives on traction of trains (CT-0059)]. Kiev, 2003. 85 p. (Ukr.)
 16. *Nakaz №206-TsZ. Pravila tyagovih rozrahunkiv dlya poyiznoyi roboti po elektrovozah ChS7, ChS8, DE1, DS3, 2EL5, 2EES5K, teplovozah TEP150, TEM103, dizel-poyizdah DEL-02, elektropoyizdah EPL2T, EPL9T (CT-0199)* [Order №206-C. Rules of traction calculations for train operation on electric locomotives CHS7, CHS8, DE1, DS3, 2EL5, 2EES5K, diesel locomotives TEP150, TEM103, diesel trains del-02, electric trains EPL2T, EPL9T (CT-0199)]. Kiev, 2010. 78 p. (Ukr.)
 17. *Nakaz №113-Ts. Metodika rozrahunku norm vitrat dizelnogo paliva i elektroenergiyi na tyagu poyizdiv (CT-0099)* [Order №113-C. Methodology for calculating diesel fuel and electricity consumption rates for train traction (CT-0099)]. Kiev, 2004. 62 p. (Ukr.)
 18. *Nakaz №204-Ts. Polozhennya pro inspektsiyu z kontrolyu efektyvnosti vykorystannya enerhore - ursiv Ukrzaliznytsi* [Order №204-C. Regulations on inspection of energy efficiency control of Ukrzaliznytsia]. Kiev, 2014. 10 p. (Ukr.)

Рецензент: А.О. Лямзін
д-р техн. наук, доц., ДВНЗ «ПДТУ»

Стаття надійшла 23.03.2021

АВТОМОБІЛЬНИЙ ТРАНСПОРТ

УДК 656.13

doi: 10.31498/2225-6733.42.2021.240703

© Burlakova H.Y.¹, Bukina M.D.²**RATIONALE OF THE «SAFETY» INDICATOR DIFFERENTIATION
AND ITS IMPLEMENTATION INTO THE DCRE SYSTEM**

The article considers the «safety» indicator and its components to determine the importance of each component of the indicator in the system assessing the quality of services in automobile transportation. The degree of the necessity of the indicator components in the system assessing the quality of passenger automobile transportation, as well as the degree of influence of each component on the quality of the services for the passenger transportation has been determined.

Keywords: quality assessment, indicators, transport service, transportation process, passenger traffic, differentiation, components.

Бурлакова Г.Ю., Букіна М.Д. Обґрунтування диференціації показника «безпека» і імплементація його в систему ВАДС. У статті наведено детальний розгляд показника «безпека» та його компонентів для визначення важливості кожного компонента показника в системі оцінки якості надання послуг з перевезення пасажирів автомобільним транспортом. Визначено ступінь необхідності компонентів показника в системі оцінки якості пасажирських перевезень, а також ступінь впливу кожного компонента на якість надання послуг по перевезенню пасажирів автомобільним транспортом. З аналізу робіт вчених, які досліджували показник безпеки, не представляється можливим скласти класифікацію елементів показників, тому що відсутнє дроблення суцільного показника «безпека» на елементи. Але єдиний показник недоцільний, тому що безпека повинна розглядатися в симбіозі трьох видів безпеки (безпеки транспортного засобу, безпеки водія, безпеки пасажирів). На підставі проведення анкетування пасажирів і перевізників м. Маріуполя з визначення наявності та використання запропонованих компонентів показника «безпека» в оцінці якості перевізного процесу при пасажирських автомобільних перевезеннях була розглянута і визначена динаміка змін цих компонентів. В результаті експертної оцінки працівниками автотранспортних підприємств і пасажирами по визначенню наявності і використання запропонованих компонентів показника оцінки якості перевізного процесу при пасажирських автомобільних перевезеннях можна зробити наступні висновки: динаміка збільшення всіх компонентів показника «безпека» свідчить про те, що безпечні умови пересування пасажирів поліпшуються (по наявності збільшення коефіцієнтів безпеки). Ґрунтуючись на загальнонауковій системі «Водій–Автомобіль–Дорога–Середовище» ВАДС, застосовуючи її до перевезення пасажирів, в даній роботі пропонується ввести в систему ВАДС складовий компонент П (пасажир) і розглянути її з точки зору безпеки людського життя. У якості прикладу одного з елементів складеного компонента П може служити професіоналізм водія, який може оцінюватися, виходячи з підтвердженого числа ДТП за минулий рік, і визначити його як критерій «професійна придатність» (ПП) виконавців транспортних послуг. Визначено додатковий

¹ Cand. Sc. (Engineering), associate professor, SHEI «Priazovskyi state technical university», Mariupol, ORCID: 0000-0003-1873-5518, galochkagoogl@gmail.com

² PhD student, SHEI «Priazovskyi state technical university», Mariupol, ORCID: 0000-0003-3977-6714, masha.bukina3006@gmail.com

компонент П для системи ВАДС при пасажирських перевезеннях, який мотивує дослідників на перерозгляд цієї системи при дослідженні її в сфері безпеки пасажирських перевезень. Отже, розгляд компонентів системи ВАДСП дає можливість скласти більш детальну динаміку змін наявності і застосування компонентів показника «безпека» в системі оцінки якості перевезення пасажирів. Аналіз розглянутих компонентів показника «безпека» в системі оцінки якості транспортного обслуговування пасажирів дозволяє зробити наступні висновки: 1) фахівцями з оцінки якості послуг міського пасажирського транспорту (МПТ) по-різному представляється значимість показника «безпека», і сам показник не ділиться на окремі компоненти; 2) розглянутий авторами показник «безпека» різний по своїй змістовній суті; 3) показник «безпека» при пасажирських перевезеннях повинен розглядатися диференційовано для зваженої оцінки безпеки всіх компонентів в системі оцінки якості пасажирських перевезень.

Ключові слова: оцінка якості, показники, безпека, перевізний процес, пасажирські перевезення, диференціація, компоненти.

Description of the problem. Based on the results of the previous study, the main indicators for assessing the quality of passenger traffic have been identified and grouped, which are correlated from the point of view of the passenger and the carrier and the most clearly describe the quality of passenger transport services.

Most groups of indicators according to these standards are identical; therefore, having analyzed and systematized groups of quality indicators specified in DSTU R 51004-96 and DIN EN 13816:2002, it is possible to make classification of quality indicators of work of buses proceeding from the following indicators: indicators of information service, indicators of comfort, speed indicators, timeliness indicators, safety indicators.

But researchers in their work have determined that the general indicators of the quality of passenger transportation should include the following indicators: accessibility, reliability, comfort, information, safety, regularity, efficiency.

Analysis of recent research and publications. Considering the indicators presented in scientific works, according to state and international standards for assessing the quality of passenger transport services, in the hierarchical system of indicators or by the level of ranking, the general groups of indicators are defined [1]: (1) Accessibility; (2) Reliability; (3) Regularity; (4) Timeliness; (5) Speed; (6) Informativeness; (7) Cost-effectiveness; (8) Comfort; (9) Preservation of luggage; (10) Contact; (11) Safety; (12) Efficiency; (13) Ease of use.

From the analysis of foreign experience in the organization of municipal transport, it has been determined that the quality of service is constantly monitored and is as close as possible to the needs of passengers [2-7]. However, a number of issues, namely: quantitative measurement of the quality of public transport services, forms, methods and techniques of its control and improvement, etc., remain to be solved.

The indicator, which is the ninth in the ranking list (from the point of view of the scientists studying the problems in this area), is not significant; it being safety. Here is a more detailed consideration of the indicator «safety» to determine the importance of each of the components of this indicator in the system of assessing the quality of services for the transportation of passengers by motor transport.

Purpose of the article is to determine the degree of necessity for the component «safety» in the system of indicators for assessing the quality of passenger transportation; consideration of the feasibility of each component of this indicator, determining the degree of the component «safety» influence on the quality of passenger automobile transportation.

Presentation of the main material. Safety indicators characterize [8] the features of passenger traffic, which determine the safety of passengers. Transportation safety is one of the mandatory requirements. There are several types of safety in passenger transportation, namely: vehicle safety, driver safety, passenger safety. Passenger safety is the main quality requirement for all types of passenger transportation and is formed taking into account special sectoral documents and regulations.

Safety is one of the most complicated categories to assess the quality of public transport ser-

vices. The main problem is that in addition to objective (technical) parameters, such as: accident-free travel, technical characteristics of the vehicle, the availability of emergency exits, there are also psychophysiological factors that influence the sense of safety of passengers and drivers in passenger transportation [9].

In English-language sources, two terms are used to describe the term «safety», namely «safety» – safety, which means a low probability of an accident and «security» – which means a low probability of becoming a victim and witness of a crime.

If the parameter «safety» is considered in conjunction with other characteristics of the transport service (eg, speed, accessibility), the consumer usually does not single it out and may even reduce the importance of this parameter, not perceiving it as a parameter influencing the choice of means of transportation. This is because public transport is initially perceived by the consumer as relatively safe. However, when assessing safety as a separate factor, passengers single it out as one of the most important [10]. For example, when the speed is increased by the driver on the route, the passenger feels the danger, but not in the fact that he will not be able to reach the destination, but in the fact that increasing the speed results in a danger to his life. The same refers to the feeling of security at bus stops [11].

From the analysis of the works of scientists who studied the safety indicator [12-14], it is impossible to classify the elements of indicators, because there is no fragmentation of the integrate safety indicator into elements, but it is not appropriate, because safety should be considered simultaneously in a symbiosis of the three types of safety (vehicle safety, driver safety, passenger safety).

In case of correlation of these three types of safety it is possible to make classification of the elements of safety in passenger transportations:

- reliability of buses operation (coefficient of technical preparedness of a vehicle ($\alpha_{T,r}$) etc.);
- safety while waiting for getting on the vehicle (equipping the stopping points, etc.) – S_w ;
- safety at embarkation and disembarkation of passengers – S_{e-d} ;
- safety during transportation – S_t .

Through the questioning of passengers and carriers of Mariupol with the aim of determining the availability and use of the proposed components of the indicator «safety» in assessing the quality of the passenger automobile transportation, the dynamics of changes in these components has been considered and defined (Fig. 1).

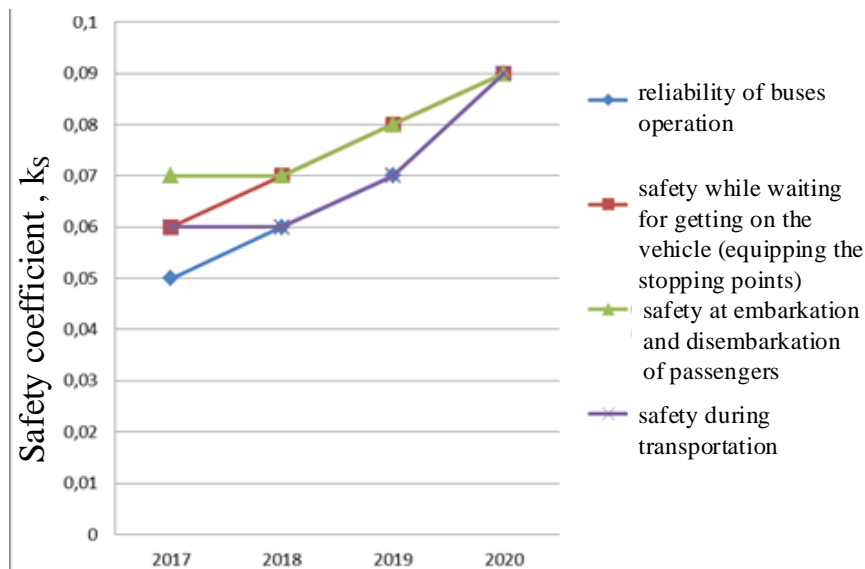


Fig. 1 – Dynamics of changes of «safety» indicator components

As a result of expert assessment by employees of motor transport companies and passengers with the aim of determining the availability and use of the proposed components of the indicator «safety» in assessing the quality of the passenger automobile transportation it has been concluded: all the components of the indicator «safety» increase and the dynamics of changes in these components points to the fact that safety in passenger transportation improves (the coefficients growing) (Fig. 1).

The authors [12] have identified the first component of this indicator as the reliability of buses, and consider it to be the coefficient of technical readiness of the bus ($\alpha_{t,r}$). But this component is identical to the component of the probability of trouble-free transport operation. The author [13] relates this indicator to the created complex indicator of the level of passenger service in terms of the indicator that characterize the importance of the corresponding indicator of the service level; it may refer to the indicator «reliability» in the system of assessing the quality of passenger automobile transportation.

It should be noted that the criterion of readiness of the vehicle to perform that very particular transportation, which is considered in the given work [12], namely: staffing with skilled workers, availability of rescue equipment, first aid equipment, equipment and inventory, normative documents, route maps, etc., can be related to the first component of the indicator «safety».

In the work [8] the author defines the fourth component of the safety indicator, as safety while waiting for getting into the vehicle (embarkation) (equipping of stopping points), as the appropriate phase of passengers stay time in the transportation system, that creates safe conditions while waiting for the vehicle.

The following fifth and sixth criteria of the indicator «safety» are assessed in the same way, namely: safety at embarkation and disembarkation of passengers and safety during transportation, as the appropriate phase of passenger participation in the transportation process, which creates safe conditions for passengers.

When assessing safety related to road accidents, such indicators as the number of accidents per 1000 km, the number of accidents per 1 million of the transported passengers are often used. For example, the professionalism of the driver is assessed based on the confirmed number of accidents during the past year, the result being compared to the average factor over the route over the last three years. Other researchers, for example, Nathanail E., professor at the University of Thessaloniki [14], use a comparative scale for the average number of fatal accidents over the past five years.

For example, 0 points are assigned to the carrier that more than doubled the average number of accidents, while 10 points are assigned to the carrier if the number of accidents is below average. Intermediate points are distributed proportionally. Similar assessment methods are used in the calculation of security indicators related to crimes. In particular, the value of the indicator can be assigned based on the calculation of the number of registered crimes for a certain period of time. In addition, not only cases involving law enforcement are taken into account, but just complaints from passengers as to dangerous situations, anti-social behavior of individuals, etc. as well. Survey methods can also serve as a basis for the formation of an indicator of passenger satisfaction with the safety of public transport services. As a comparative base, it is necessary to use statistical data, for example, data from satisfaction surveys or transport crime statistics over the past few years and to make comparisons with the current indicators.

Based on the general scientific system «Driver–Car–Road–Environment» (DCRE) [15], applying it to the passenger transportation the work proposes to introduce the component P (passenger) into the DCRE and consider it in terms of human safety (Fig. 2).

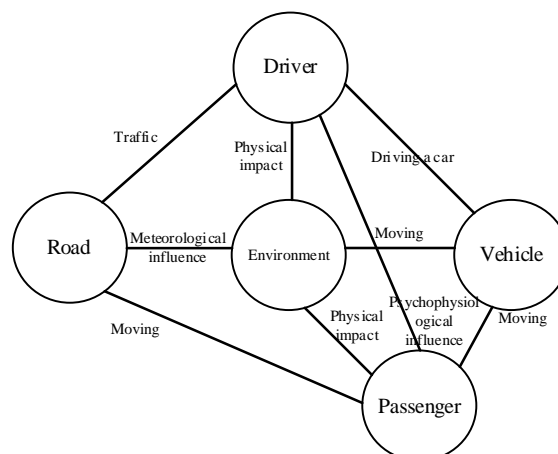


Fig. 2 – Scheme of the proposed DCREP system

Professionalism of the driver, which can be assessed based on the confirmed number of accidents over the past year, may serve as an example of one of the elements of the component P (passenger); and it can be defined as the criterion «professional suitability» (P_s) of transport service providers. The elements of the component P are considered in table.

Table

Components of the proposed system DCREP

Driver	Car	Road	Environment	Passenger
1. Experience 2. Preparation 3. Abilities 4. Psychophysiological state 5. Age 6. Traffic Rules	1. Technical condition 2. Passive safety 3. Active safety 4. Post-accident safety	1. Coating 2. Road conditions (signs, markings, etc.) 3. Traffic intensity	1. External environment (climatic conditions) 2. Internal environment (exhaust, dust, vibration, etc.)	1. Timeliness 2. Comfort 3. Security 4. Fatigue 5. Reliability

The identified additional component P (passenger) for the DCRE system in passenger transportation urges researchers to reconsider this system when studying it in terms of passenger transportation safety. Thus, consideration of the components of the DCREP system makes it possible to compile a more detailed dynamics of changes in the availability and application of the components of the indicator "safety" in the system of assessing the quality of passenger transportation.

Thus, the indicator «safety» develops a composition of its main components and thus the indicator becomes more significant than the other indicators in the system of assessing the quality of passenger automobile transportation.

Conclusions

The analysis of the considered components of the indicator «safety» in the system of assessment of quality of transport service of passengers makes it possible to draw the following conclusions:

1. Specialists in assessing the quality of urban passenger transport services (UPT) differently represent the importance of the indicator «safety» and the indicator itself is not divided into separate components.
2. The indicator «security» analyzed by the authors is basically different in its substantive essence.
3. The indicator «safety» in passenger traffic should be considered in different ways for a balanced assessment of the safety of all components in the quality assessment system of passenger transportation.

References:

1. Burlakova G.Y., Bukina M.D. Sistematizatsiya otsinki yakosti perevızhnogo protsesu pri pasazhirs'kikh perevezennyakh [Systematization of the quality assessment of the transportation process during passenger transportation]. *Visnik Priazovs'kogo Derzhavnogo Tekhnichnogo Universitetu. Seriya: Tekhnichni nauki – Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical sciences*, 2019, no. 39, pp. 166-174. doi: 10.31498/2225-6733.39.2019.201071. (Ukr.)
2. Johansen, Larsen O.I., Norheim B. Towards achievement of both allocative efficiency & X-efficiency in public transport. *Journal of Transport Economics and Policy*, 2001, vol. 35, no. 3, pp. 491-511.
3. Hensher D., Stopher P., Bullock P. Service quality – developing a service quality index in the provision of commercial bus contracts. *Transportation Research*, 2003, vol. 37, no. 6, pp. 499-517. doi: 10.1016/S0965-8564(02)00075-7.
4. Hensher D., Stanley J. (2003). Performance-based quality contracts in bus service provision. *Transportation Research*, 2003, vol. 37, no. 637, pp. 519-530. doi: 10.1016/S0965-8564(03)00006-5.
5. Friman M. Implementing quality improvements in public transport. *Journal of Public Transportation*, 2004, vol. 7, no. 4, pp. 49-65. doi: 10.5038/2375-0901.7.4.3.

6. Bates J., Polak J., Jones P., Cook A. The valuation of reliability for personal travel. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2001, vol. 37, no. 2/3, pp. 191-229. doi: 10.1016/S1366-5545(00)00011-9.
7. Swanson J., Ampt L., Jones P. Measuring bus passenger preferences. *Traffic Engineering and Control*, 1997, vol. 38, no. 6, pp. 330-336.
8. Maximkin V.N., Spirin I.V. Upravlenie kachestvom perevozk passazhirov gorodskimi avtobusami [Quality management of passenger transportation by city buses]. Moscow, ACETS Publ., 1998. 38 p. (Rus.)
9. Burlakova G.Y., Bukina M.D. Obgruntuvannya stupenya neobkhidnosti pokaznikiv yakosti v sistemі otsinyuvannya pasazhirs'kikh perevezen' [Justification of the degree of necessity of quality indicators in the passenger transportation evaluation system]. *Komunal'ne gospodarstvo mist. Seriya: Tekhnichni nauki ta arkhitektura – Municipal economy of cities. Series: Engineering science and architecture*, 2020, vol. 4 no. 157, pp. 152-157. doi: 10.33042/2522-1809-2020-4-157-152-157. (Ukr.)
10. Solomon K.M., Solomon R.J., Sillien J.S. Passenger psychological dynamics: sources of information on urban transportation. New York, 1968. 181 p.
11. Eboli L., Mazzulla G. Performance indicators for an objective measure of public transport service quality. *European Transport*, 2012, iss. 51, pp. 1-4.
12. DSTU ISO 9000-2001. *Sistemi upravlinnya yakistyu. Osnovni polozhennya ta slovník* [State Standard ISO 9000-2001. Management systems. Basic position and vocabulary]. Kiev, Derzhstandart Ukrainy Publ., 2001. 33 p. (Ukr.)
13. Shabanov A.V. *Regional'nye logisticheskie sistemy obshchestvennogo transporta: metodologiya formirovaniya i mekhanizm upravleniya* [Regional logistic systems of public transport: formation methodology and management mechanism]. Rostov-na-Donu, SKNC VSHCH Publ., 2001. 205 p. (Rus.)
14. Nathanail E. Measuring the quality of service for passengers on the hellenic railways. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2008, vol. 42, iss. 1, pp. 48-66. doi: 10.1016/j.tra.2007.06.006.
15. Stepanov I.S., Pokrovsky Yu.Yu., Lomakin V.V., Moskaleva Yu.G. *Vliyaniye elementov sistemy voditel'-avtomobil'-doroga-sreda na bezopasnost' dorozhnogo dvizheniya* [Influence of elements of the system driver-car-road-environment on road safety]. Moscow, MSTU «MAMI» Publ., 2011. 171 p. (Rus.)

Перелік використаних джерел:

1. Бурлакова Г.Ю. Систематизація оцінки якості перевізного процесу при пасажирських перевезеннях / Г.Ю. Бурлакова, М.Д. Букіна // Вісник Приазовського державного технічного університету. – Маріуполь, 2019. – № 39. – С. 166-174. – (Серія: Технічні науки). – Режим доступу: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.39.2019.201071>.
2. Johansen K.W. Towards achievement of both allocative efficiency and X-efficiency in public transport / K.W. Johansen, O.I. Larsen, B. Norheim // *Journal of Transport Economics and Policy*. – 2001. – Vol. 35, № 3. – Pp. 491-511.
3. Hensher D. Service quality – developing a service quality index in the provision of commercial bus contracts / D.A. Hensher, P. Stopher, P. Bullock // *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. – 2003. – Vol. 37, № 6. – Pp. 499-517. – Mode of access: [https://doi.org/10.1016/S0965-8564\(02\)00075-7](https://doi.org/10.1016/S0965-8564(02)00075-7).
4. Hensher D. Performance-based quality contracts in bus service provision / D.A. Hensher, J. Stanley // *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. – 2003. – Vol. 37, № 6. – Pp. 519-530. – Mode of access: [https://doi.org/10.1016/S0965-8564\(03\)00006-5](https://doi.org/10.1016/S0965-8564(03)00006-5).
5. Friman M. Implementing quality improvements in public transport / M. Friman // *Journal of Public Transportation*. – 2004. – Vol. 7, № 4. – Pp. 49-65. – Mode of access: <https://doi.org/10.5038/2375-0901.7.4.3>.
6. The valuation of reliability for personal travel / J. Bates, J. Polak, P. Jones, A. Cook // *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. – 2001. – Vol. 37, № 2/3. – Pp. 191-229. – Mode of access: [https://doi.org/10.1016/S1366-5545\(00\)00011-9](https://doi.org/10.1016/S1366-5545(00)00011-9).

7. Swanson J. Measuring bus passenger preferences / J. Swanson, L. Ampt, P. Jones // *Traffic Engineering and Control*. – 1997. – Volume 38, no. 6. – Pp. 330-336.
8. Максимкин В.Н. Управление качеством перевозок пассажиров городскими автобусами / В.Н. Максимкин, И.В. Спирин. – М. : АЦЕТС, 1998. – 38 с.
9. Бурлакова Г.Ю. Обґрунтування ступеня необхідності показників якості в системі оцінювання пасажирських перевезень / Г.Ю. Бурлакова, М.Д. Букіна // *Комунальне господарство міст*. – Харків, 2020. – Т. 4, № 157. – С. 152-157. – (Серія: Технічні науки та архітектура). – Режим доступу: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2020-4-157-152-157>.
10. Solomon K.M. Passenger psychological dynamics: sources of information on urban transportation / K.M. Solomon, R.J. Solomon, J.S. Sillien. – New York, 1968. – 181 p.
11. Eboli L. Performance indicators for an objective measure of public transport service quality / L. Eboli, G. Mazzulla // *European Transport*. – 2012. – Iss. 51. – Pp. 1-4.
12. ДСТУ ISO 9000-2001. Системи управління якістю. Основні положення та словник. – Введ. 2001-06-27. – К. : Держстандарт України, 2001. – 33 с. – (Національний стандарт України).
13. Шабанов А.В. Региональные логистические системы общественного транспорта: методология формирования и механизм управления / А.В. Шабанов. – Ростов-на-Дону : СКНЦ ВЦ, 2001. – 205 с.
14. Nathanail E. Measuring the quality of service for passengers on the hellenic railways / E. Nathanail // *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. – 2008. – Vol. 42, iss. 1. – Pp. 48-66. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.tra.2007.06.006>.
15. Влияние элементов системы водитель-автомобиль-дорога-среда на безопасность дорожного движения : учебное пособие / И.С. Степанов, Ю.Ю. Покровский, В.В. Ломакин, Ю.Г. Москалева – М. : МГТУ «МАМИ», 2011. – 171 с.

Reviewer: A.M. Berestovyy
PhD in Engineering, associate professor, SHEI «PSTU»

The article was admitted on 16.03.2021

ДО УВАГИ АВТОРІВ!

До публікації у збірнику приймаються тільки наукові статті, виконані відповідно до вимог Постанови Президії ВАК України від 15.01.2003р. № 7-05/1, які мають наступні необхідні елементи: **постановка проблеми** у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями; **аналіз останніх досліджень і публікацій**, в яких започатковано розв'язання даної проблеми і на які спирається автор, виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття; **формулювання цілей статті** (постановка завдання); **виклад основного матеріалу** дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів; **висновки** з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямку та **перелік використаних джерел** (оформлений відповідно до стандартів – ГОСТ 7.1-84, ДСТУ 3582-97, ГОСТ 7.12-93). Список джерел повинен бути складений в порядку спогаду в тексті. Посилання на літературу поміщають у квадратні дужки. Після списку використаних джерел надається пристатейна бібліографія латиницею (**References**).

Стаття може бути представлена державною мовою, англійською мовою та/або іншими офіційними мовами Європейського Союзу. Текст статті, завізований автором і власноручним підписом, подається в редакцію збірника в друкарському вигляді (**1 примірник**), з вказаними робочими телефонами та електронними адресами авторів.

Стаття приймається до розгляду тільки при наявності відповідних супровідних документів та електронного варіанту на електронному носії у вигляді текстового файлу у форматі редактора Microsoft Office Word.

Формат листа – А4. Розміри полів: верхнє, нижнє – по 20 мм; ліве, праве – по 25 мм Основний текст набирається шрифтом Times New Roman, розмір 11, міжрядковий інтервал – 1,0. Червоний рядок абзаців відповідає відступу – 1 см. Нумерація сторінок не проставляється. Вирівнювання тексту виконується по ширині. Для спеціальних символів і формул використовувати шрифт Symbol MT Extra, в редакторі формул слід використовувати математичний курсив. Графічний матеріал, представлений у вигляді малюнків і графіків, повинен бути вмонтований в текст статті.

Стаття повинна містити номер УДК (в лівому верхньому кутку). На наступному рядку по правому полю, жирним шрифтом, розмір 11 – прізвище, ім'я та по батькові (у називному відмінку) з надрядковими номерами; в нижній частині першої сторінки у вигляді зноски курсивом, розмір шрифту 10 (дивись строку меню: Вставка / Ссылка / Сноска) – науковий ступінь, вчене звання (як що немає – посада), місце роботи (без скорочень), місто, адреса електронної пошти; іноземні автори вказують назву країни. Далі, після міжрядкового інтервалу друкується назва статті (прописними літерами, по центру, без заключної крапки); анотації двома мовами (для статей не англійською мовою обсяг анотації англійською мовою – не менш як 1800 знаків, включаючи ключові слова; для статей не українською мовою обсяг анотації українською мовою – не менш як 1800 знаків, включаючи ключові слова), першою наводиться анотація на мові статті (відступ зліва і справа по 1 см, курсивом) та ключові слова (від трьох до восьми).

Наприкінці статті повинні бути приведені ініціали, прізвище, вчений ступінь, вчене звання, місце роботи рецензента; дата подачі статті.

До статті надаються наступні супровідні матеріали (**по одному примірнику**):

- експертний висновок про можливість публікації статті у відкритому друці;
- рецензія фахівця за профілем статті (доктора наук), в якій повинні бути відображені наукова новизна результатів, їх цінність і значущість, зауваження по суті статті і по її оформленню;
- згода на обробку персональних даних (окрема для кожного з співавторів);
- ліцензійний договір (у **двох екземплярах**).

Форми необхідних документів та вимоги до оформлення статей представлені на сайті (http://journals.uran.ua/vestnikpgtu_tech/requirements). Архів видань див.: <http://eir.pstu.edu/handle/123456789/1>, http://journals.uran.ua/vestnikpgtu_tech/issue/archive.

Відповідальність за зміст статті несе автор. Статті, що не відповідають зазначеним вимогам, не розглядаються.

Повністю оформлені статті і необхідні документи передаються в редакцію збірника відповідальному секретарю Савенко Ользі Сергіївні (ГВУЗ «ПДТУ», 2-ий учбовий корпус, ауд. 175, тел.: (0629) 44-62-34.

Підписано до друку 27.05.2021 р.
Папір тип № 2. Умов. друк. ар. 23,71. Тираж 400.
Замовлення № 49. Матеріали збірника
друкуються мовою оригіналу. Ціна договірна
Надруковано у видавничо-поліграфічному центрі ДВНЗ «ПДТУ»
вул. Університетська, 7, м. Маріуполь, Донецька обл., 87555, Україна