

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ
І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

MINISTRY OF EDUCATION
AND SCIENCE OF UKRAINE

National Technical University
"Kharkiv Polytechnic Institute"

**Вісник Національного
технічного університету
«ХПІ». Серія: Нові рішення
в сучасних технологіях**

№ 1(7)' 2021

Збірник наукових праць

Видання засноване у 1961 р.

**Bulletin of the National
Technical University
"KhPI". Series: New solutions
in modern technology**

No. 1(7)' 2021

Collection of Scientific papers

The edition was founded in 1961

Харків
НТУ «ХПІ», 2021

Kharkiv
NTU "KhPI", 2021

Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology : зб. наук. пр. / Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». — Харків : НТУ «ХПІ», 2021. — № 1(7). — 111 с. — ISSN 2079-5459.

Видання публікує наукові результати та досягнення мультидисциплінарних досліджень молодих науковців широкого профілю у сферах машинобудування, енергетики, технологій органічних і неорганічних речовин, екології, інформаційних технологій і систем управління, техніки та електрофізики високих напруг, а також з фундаментальних аспектів сучасних технологій.

The journal publishes scientific results and accomplishments of multidisciplinary researches of young scientists of a wide profile in the field of machine building, energy, technologies of organic and inorganic substances, ecology, information technologies and control systems, high voltage techniques and electrophysics, as well as on the fundamental aspects of modern technologies.

Свідоцтво про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації України
КВ № 23776-13616 від 14 лютого 2019 року.

Мова статей – українська, англійська.

Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях включено до «Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора наук, кандидата наук та ступеня доктора філософії», **категорія «Б»** (накази МОН України № 409 від 17.03.2020 р. та №886 від 02.07.2020 р.).

Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: «Нові рішення в сучасних технологіях» включений до зовнішніх інформаційних систем, у тому числі в наукометричну базу даних Index Copernicus (Польща), бібліографічну базу даних OCLC WorldCat (США), індексується пошуковими системами Google Scholar і Crossref; зареєстрований у світовому каталозі періодичних видань бази даних Ulrich's Periodicals Directory (New Jersey, USA).

Офіційний сайт видання: <http://vestnik2079-5459.khpi.edu.ua/>

Засновник
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

Founder
National Technical University
"Kharkiv Polytechnic Institute"

Редакційна колегія

Відповідальний редактор:

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

Члени редколегії:

Авдєєва О. П., НТУ «ХПІ», Україна

Брагіна Л. Л., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Буряковський С. Г., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Вехов Є., Мерилендський університет, США

Гораш Є., проф., Університет Стратклайда, Великобританія

Данильченко Д. О., НТУ «ХПІ», Україна

Демидов І. М., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Заковоротний О. Ю., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Клепиков В. Б., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Куліченко В. В., доц., НТУ «ХПІ», Україна

Ларін О. О., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Львов Г. І., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Мележик Є., Інститут фізики напівпровідників імені В. Є.

Лашкарьова НАНУ, Україна

Меньшикова С. І., НТУ «ХПІ», Україна

Мінакова К. О., НТУ «ХПІ», Україна

Піментел С. Р., проф., Федеральний Університет Гояс,

Бразилія

Раскін Л. Г., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Томашевський Р. С., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Чжан К. Л., проф., Вроцлавський технологічний університет,

Польща

Шевченко С. Ю., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Шестопапов О. В., доц., НТУ «ХПІ», Україна

Editorial staff

Associate editor:

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

Editorial staff members:

Avdieieva O. P., NTU "KhPI", Ukraine

Bragina L. L., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Buriakovskii S. G., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Vekhov Ye., University of Maryland, College Park, USA

Gorash Ye., prof., University of Strathclyde, UK

Danylchenko D. O., NTU "KhPI", Ukraine

Demidov I. N., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Zakovorotnyi A. Yu., prof., NTU "KPI", Ukraine

Klepikov V. B., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Kulichenko V. V., docent, NTU "KhPI", Ukraine

Larin A. A., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Lvov G. I., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Melezhih Ye., V.E. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics

NAS of Ukraine, Kiev, Ukraine

Menshikova S. I., NTU "KhPI", Ukraine

Minakova K. O., NTU "KhPI", Ukraine

Pimentel S., prof., Federal University of Goias, Brazil

Raskin L. G., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Tomashevskiy R. S., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Chrzan K. L., prof., Wroclaw University of Technology, Poland

Shevchenko S. Yu., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Shestopalov A. V., docent, NTU "KhPI", Ukraine

Рекомендовано до друку Вченою радою НТУ «ХПІ».

Протокол № 3 від 26 березня 2021 р.

УДК 621.318

doi:10.20998/2413-4295.2021.01.01

ПЛОСКИЙ КРУГОВИЙ СОЛЕНОЇД МІЖ МАСИВНИМИ БІФІЛЯРНИМИ КОТУШКАМИ. АНАЛІЗ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ

Ю. В. БАТИГІН, О. Ф. ЄРЬОМІНА*, С. О. ШИНДЕРУК, Є. О. ЧАПЛИГІН, Б. Е. БЕНСБАА

кафедра фізики, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, УКРАЇНА
*e-mail: elena.yeryomina@gmail.com

АНОТАЦІЯ Представлено аналіз і чисельні оцінки індукційних ефектів в металі плоского кругового соленоїда, розташованого між гілками зовнішньої біфілярної котушки в плоскій індукторній системі, що збуджується односпрямованими струмами в обмотках біфіляра. Такий пристрій, конструктивне виконання якого вперше було запропоновано раніше авторами цієї роботи, може мати практичний інтерес для схем обладнання магнітно-імпульсної обробки металів. Застосування даної індукторної системи дає можливість мінімізувати вплив індукційних ефектів на електромагнітні процеси в металі внутрішнього індуктора. Отримано чисельні оцінки для індуктованих струмів, що збуджуються в металі внутрішнього кругового індуктора, розміщеного між зовнішніми обмотками біфілярної котушки. Показано, що в низькочастотному режимі діючих полів часова залежність струму, що збуджується, є похідна від часової залежності збуджуючого струму, а поперечний розподіл струму в металі внутрішнього індуктора являє собою лінійну залежність, що проходить через центральну вісь індуктора. У високочастотному режимі діючих полів часова залежність і радіальний розподіл струму, що збуджується, збігаються з відповідними аналогами для збуджуючого струму, а поперечний розподіл індуктованого струму має характер, властивий різкому поверхневому ефекту, коли індуктований струм витісняється на граничні поверхні металу. Доведено, що мінімальний вплив полів зовнішнього біфіляра на електромагнітні процеси у внутрішньому індукторі має спостерігатися в низькочастотному режимі, коли просторова суперпозиція різноспрямованих індуктованих струмів дає в сумі нульову величину електрорушійної сили індукції, що збуджується. Результати аналізу, здійсненого на основі проведених конкретних обчислень, спрямовані на пошук умов успішної технічної реалізації запропонованої індукторної системи. Вельми перспективним в напрямку наступних досліджень може бути створення працездатних моделей запропонованих індукторних систем і проведення експериментів по визначенню реальних умов їх максимальної ефективності.

Ключові слова: біфілярна котушка; індукторна система; електромагнітні процеси; односпрямовані струми; просторово-часова залежність; чисельні оцінки; розрахункова модель

FLAT CIRCULAR SOLENOID BETWEEN MASSIVE BIFILAR COILS. ANALYSIS OF ELECTROMAGNETIC PROCESSES

Yu. V. BATYGIN, O. YERYOMINA, S. SHINDERUK, E. CHAPLYGIN, B. E. BENSBAА

Department of Physics, Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT An analysis and numerical estimates of induction effects in the metal of a flat circular solenoid located between the branches of an external bifilar coil in a flat inductor system excited by unidirectional currents in the bifilar windings are presented. Such a device, the design of which was first proposed earlier by the authors of this work, is of practical interest for circuits of equipment for magnetic-pulse processing of metals. The use of the considered inductor system makes it possible to minimize the influence of induction effects on electromagnetic processes in the metal of the internal inductor. Numerical estimates are obtained for the induced currents excited in the metal of the inner circular inductor placed between the outer windings of the bifilar coil. It is shown that in the low-frequency mode of acting fields, the time dependence of the excited current is a derivative of the time dependence of the exciting current and the transverse distribution of the current in the metal of the internal inductor is a linear dependence passing through the central axis of the inductor. In the high-frequency regime of acting fields, the time dependence and the radial distribution of the excited current coincide with the corresponding analogs for the exciting current, and the transverse distribution of the induced current is characteristic of a sharp surface effect, when the induced current is displaced to the boundary surfaces of the metal. It is proved that the minimum influence of the fields of the external bifilar on the electromagnetic processes in the internal inductor should be observed in the low-frequency mode, when the spatial superposition of multidirectional induced currents adds up to the zero value of the excited electromotive force of induction. The results of the analysis based on the specific calculations performed are aimed at finding the conditions for the successful technical implementation of the proposed inductor system. The creation of workable models of the proposed inductor systems and experiments to determine the real conditions for their maximum efficiency are seen as very promising in the direction of subsequent research.

Keywords: bifilar coil, inductor system; electromagnetic processes; unidirectional currents; space-time dependence; numerical estimates; calculation model

Вступ

Біфілярні електротехнічні конструкції, або просто біфіляри, мають у наявності два паралельних провідника, струми в яких можуть протікати в одному

або протилежних напрямках. У першому випадку результуюче магнітне поле звертається в нуль у внутрішній порожнині між провідниками, у другому – нуль напруженості магнітного поля має місце в просторі поза провідниками. Зазначена особливість

біфілярів становить практичний інтерес для створення електротехнічних пристроїв, де індукційні ефекти повинні бути пригнічені, або, навпаки, посилені.

Короткий огляд літератури

Біфілярні котушки, як елементи електричних ланцюгів з низькими реактивними параметрами, представлені у відомому підручнику, що пережив кілька перевидань [1]. Не ігноруючи добре відомих застосувань біфілярів (малоіндуктивні омичні опори, обмотки імпульсних реле, блоки живлення в електроніці та ін.) [2], відзначимо сучасні області їх використання, такі, як розробки датчиків різного призначення, що дозволяють здійснити перетворення вимірюваного природного параметра в еквівалентний електричний сигнал [3]. Необхідно відзначити і досягнення в технологіях їх виробництва для промислового приладо- і електроапаратобудування [4].

Розвитку методів розрахунку характеристик електромагнітних процесів в соленоїдах, які виступають в якості джерел сильних полів для технологічних цілей і полів випромінювання в передавальних пристроях, присвячені роботи [5,6]. Із сучасних праць з розрахунками котушок різноманітної геометрії можна виділити наукову монографію [7], присвячену ефективним аналітичним і чисельним методам розрахунку характеристик електромагнітних процесів в елементних складових техніки сильних і надсильних полів.

Для схем обладнання магнітно-імпульсної обробки металів, описаних в [8], практичний інтерес представляють дослідження плоских індукторних систем, де багатовитковий соленоїд-індуктор розміщується між гілками біфілярної котушки. Тут слід зазначити опис аналогічних конструкцій в роботах [9,10]. Їх авторами була вперше запропонована і проаналізована дієвість біфілярної масивної котушки з внутрішнім плоским соленоїдом. Система збуджувалася односпрямованими струмами в гілках біфіляра. Його застосування мало за мету мінімізувати вплив індукційних ефектів на електромагнітні процеси в металі внутрішнього індуктора. Питання про реальні умови, при виконанні яких результуюча напруженість магнітного поля, що збуджується в площині розміщення внутрішнього соленоїда-індуктора, буде дорівнює нулю, залишилося відкритим.

Авторами роботи [11] за допомогою адекватної фізико-математичної моделі плоскої індукторної системи були отримані розрахункові співвідношення для струмів, що збуджуються в металі внутрішнього кругового соленоїда магнітним полем зовнішніх масивних котушок біфіляра.

Результати, отримані в [11], дозволяють проведення аналізу електромагнітних процесів, спрямованого на визначення екрануючої дії внутрішнього індуктора за рахунок індуктованих

струмів, порушуваних зовнішніми односпрямованими струмами в гілках обмотки біфілярної котушки.

Мета роботи

Мета цієї роботи – аналіз і чисельні оцінки індукційних ефектів в металі плоского кругового соленоїда, розташованого між гілками зовнішньої біфілярної котушки в плоскій індукторній системі, що збуджуються односпрямованими струмами в обмотках біфіляра.

Наукова новизна полягає в отриманні чисельних оцінок для струмів, що збуджуються в реальному металі плоского кругового індуктора, розміщеного між масивними обмотками біфілярної котушки з односпрямованими збуджуючими струмами. Кінцевою метою комплексу проведених досліджень є теоретичне і експериментальне обґрунтування практичної працездатності досліджуваної індукторної системи.

Аналіз електромагнітних процесів, чисельні оцінки

Для вирішення поставленого завдання розглянемо необхідні залежності з роботи [11]. Для ясності у викладі наведемо фізико-математичну модель запропонованої індукторної системи (рис. 1) з прийнятими допущеннями і визначальними межі застосування отриманих авторами [11] розрахункових співвідношень.

Сформулюємо прийняті допущення.

- Фізико-математична модель досліджуваної індукторної системи представлена на рис. 1.

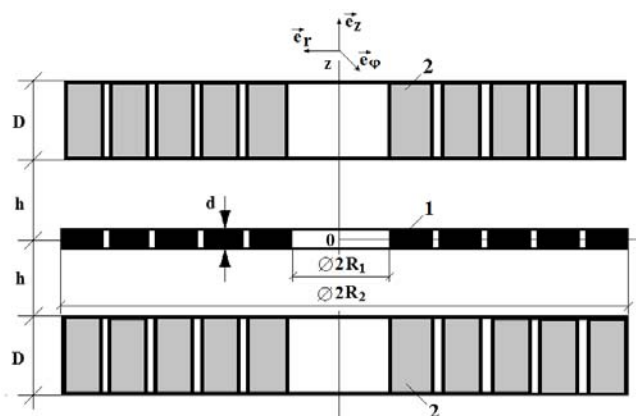


Рис. 1 – Фізико-математична модель індукторної системи,

1 - внутрішній багатовитковий соленоїд-індуктор;
2 - гілки біфіляра - плоскі багатовиткові соленоїди

- У прийнятій циліндричній системі координат об'єкт дослідження має аксіальну симетрію.

- Витки біфілярної котушки досить масивні ($D \gg R_{1,2}$) і виконані з металу, який має високу електропровідність, вони щільно прилягають один до одного, так, що їх робочі поверхні з боку індуктора-

соленоїда можна вважати суцільною поверхнею з ідеального провідника.

• По робочих поверхнях обмоток біфіляра протікає гармонійний струм з однорідною по радіусу лінійною густиною

$$j_{\varphi}(t, r, z = \pm h) = j_m \cdot \sin(\omega t) \cdot (\eta(r - R_1) - \eta(r - R_2)),$$

$$\text{де } j_m = \frac{I_m}{(R_2 - R_1)} - \text{амплітуда густини, } I_m -$$

амплітуда струму, ω – циклічна частота, $\eta(r - R_{1,2})$ – ступінчасті функції Хевісайда [9].

• Витки соленоїда-індуктора виконані з металу кінцевої товщини d з кінцевої питомою електропровідністю γ і щільно прилягають один до одного, так, що їх поверхні можна вважати суцільними.

• Часові параметри збуджуючого струму задовольняють квазістаціонарному наближенню по Ландау $\frac{\omega}{c} \cdot l \ll 1$, де c – швидкість світла у вакуумі, l – максимальний розмір в системі [7, 8].

Просторово-часовий розподіл густини струму, індукованого в металі внутрішнього індуктора, описується наступною залежністю [11]:

$$j_i(t, r, z) = 2j_m \cdot \left(\frac{\omega\tau}{d}\right) \cdot \int_0^{\infty} f(\lambda) \cdot \sum_{k=1}^{\infty} \sin\left((2k+1)\frac{\pi}{2} \cdot \frac{\zeta}{\left(\frac{d}{2}\right)}\right) \times$$

$$\times \frac{(-1)^k \cdot \sin(\omega t - \psi_k)}{\sqrt{(\omega\tau)^2 + \left(\left((2k+1) \cdot \frac{\pi}{2}\right)^2 + \left(\lambda \frac{d}{2}\right)^2\right)^2}} \cdot J_1(\lambda r) \lambda d\lambda$$

(1)

$$\text{де } \tau = \mu_0 \gamma \left(\frac{d}{2}\right)^2 - \text{характерний час дифузії поля в}$$

провідний шар з питомою електропровідністю γ і товщиною $\left(\frac{d}{2}\right)$,

$$f(\lambda) = \int_{R_1}^{R_2} r \cdot J_1(\lambda r) dr - \text{зображення однорідного}$$

радіального розподілу густини збуджуючого струму в просторі Фур'є-Бесселя [12],

$\zeta \in \left[-\frac{d}{2}, +\frac{d}{2}\right]$ – поперечна координата в металі внутрішнього індуктора,

$$\psi_k = \arctg \left(\frac{\sqrt{\left(\left((2k+1) \cdot \frac{\pi}{2}\right)^2 + \left(\lambda \frac{d}{2}\right)^2\right)}}{\omega\tau} \right) - \text{фазовий}$$

зсув просторових гармонік,

$J_1(\lambda r)$ – функція Бесселя першого роду першого порядку,

λ – параметр інтегрального перетворення Фур'є-Бесселя [12].

Як було зазначено авторами [11], в практичних обчисленнях вираз (1) трансформується в декілька аналітичних залежностей, кожна з яких описує процеси, що протікають, відповідно до умов виконуваних розрахунків.

1. Низькочастотний режим – $\omega \ll \frac{1}{\tau}$ при досить малій товщині металу внутрішнього індуктора $\left(\lambda \frac{d}{2}\right)^2 \ll \left(\left(2k+1\right) \cdot \frac{\pi}{2}\right)^2$

Відповідний граничний перехід у виразі (1) призводить до наступного виразу для густини індукованого струму:

$$j_i(t, r, z) \approx j_m \cdot \left(\frac{\omega\tau}{d}\right) \cdot \cos(\omega t) \times$$

$$\times [\eta(r - R_1) - \eta(r - R_2)] \cdot \frac{\zeta}{\left(\frac{d}{2}\right)}. \quad (2)$$

Аналіз виразу (2) показує, що

- часова і просторові залежності поділяються (не пов'язані між собою);
- амплітуда сигналу, що збуджується, прямо пропорційна параметру $\omega \cdot \tau \ll 1$, який визначає частотний діапазон, і обернено пропорційна товщині металу індуктора;
- часова залежність є похідна від часової залежності збуджуючого струму, а радіальний розподіл збігається з радіальним розподілом збуджуючого струму;
- поперечний розподіл індукованого струму являє собою лінійну залежність, що проходить через центральну вісь індуктора.

Відзначимо, що перші дві позиції висновків повністю узгоджуються з результатами досліджень низькочастотних електромагнітних процесів в тонкостінних металах, представлених в науковому виданні [8].

2. Високочастотний режим $\omega \gg \frac{1}{\tau}$ при досить малій товщині металу внутрішнього індуктора $\left(\lambda \frac{d}{2}\right)^2 \ll \left(\left(2k+1\right) \cdot \frac{\pi}{2}\right)^2$.

Після граничного переходу в (1) отримуємо залежність для густини індукованого струму:

$$j_i(t, r, z) \approx \frac{4J_m}{d} \sin(\omega t) [\eta(r - R_1) - \eta(r - R_2)] \times (-1)^k \sin \left((2k+1) \frac{\pi}{2} \cdot \frac{\zeta}{\left(\frac{d}{2}\right)} \right) \times \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\left((2k+1) \frac{\pi}{2} \right)^2}{(\omega \tau)^2} \right)^2}} \quad (3)$$

З аналізу виразу (3) випливає, що

- часова і просторові залежності поділяються (не пов'язані між собою);
- амплітуда сигналу, що збуджується, істотно (в $\sim \left(\frac{4}{\omega \tau}\right)$ раз) перевищує аналогічний показник в низькочастотному часовому режимі;
- часова залежність і радіальний розподіл збігаються з відповідними аналогами для збуджуючого струму;
- поперечний розподіл визначається сумою ряду,

збіжність якого досить швидко при $\frac{\left((2k+1) \cdot \frac{\pi}{2} \right)^2}{(\omega \tau)^2} > 1$ [12].

Відзначимо, що, з фізичної точки зору, сформульовані висновки повністю узгоджуються з відомими положеннями для режиму різкого поверхневого ефекту [8].

Графічні ілюстрації поперечних розподілів густини струмів, індукованих в металі індуктора товщиною d в різних часових режимах представлені на рис. 2.

Графічні залежності на рис. 2 наочно ілюструють перехід від режиму інтенсивного проникнення порушуваних електромагнітних полів (крива 2), коли має місце просторова суперпозиція різноспрямованих струмів, що збуджуються кожним із джерел, до режиму різкого скін-ефекту (крива 3), коли індуковані струми витісняються на граничні поверхні металу внутрішнього індуктора.

Підкреслимо, що повна величина індукованого струму, визначена з виразів (1)–(3) як інтеграл по поперечній координаті $\zeta \in \left[-\frac{d}{2}, +\frac{d}{2} \right]$, дорівнює нулю у всіх часових режимах. Хоча, як видно з рис. 2, при низьких частотах нуль інтегрального струму це результат геометричного накладення індукованих струмів, а при високих частотах – це формальний результат, обумовлений однаковими, але протилежно спрямованими струмами, індукованими на поверхнях металу індуктора.

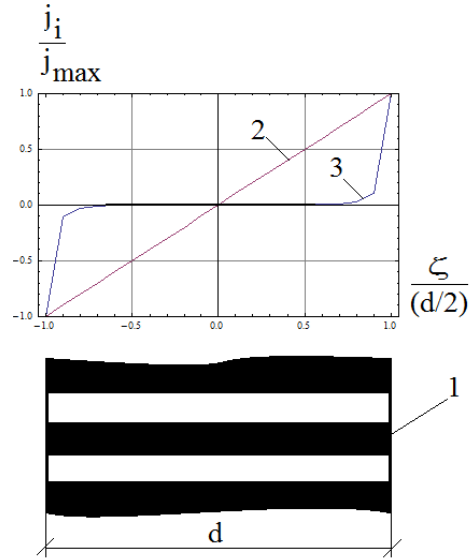


Рис. 2 – Поперечні розподіли відносних величин індукованих струмів (нормування на максимуми), 1 - внутрішній індуктор в поперечному перерізі; 2 - низькочастотний режим, $\omega \tau = 0,1$; 3 - високочастотний режим, $\omega \tau = 10$.

Узагальнюючи результати проведеного аналізу, відзначимо, що для мінімізації впливу струмів зовнішнього біфіляра на процеси у внутрішньому індукторі кращим є низькочастотний часовий режим, в якому за рахунок інтенсивного проникнення порушуваних полів просторова суперпозиція різноспрямованих індукованих струмів дає нульову сумарну величину електрорушійної сили індукції, що збуджується.

Висновки

У низькочастотному режимі інтенсивного проникнення діючих полів часова залежність струму, що збуджується, є похідна від часової залежності збуджуючого струму, а поперечний розподіл індукованого струму являє собою лінійну залежність, що проходить через центральну вісь індуктора.

У високочастотному режимі діючих полів часова залежність і радіальний розподіл струму, що збуджується, збігаються з відповідними аналогами для збуджуючого струму; поперечний розподіл індукованого струму є характерним для режиму різкого поверхневого ефекту, коли індукований струм витісняється на граничні поверхні металу.

Мінімальний вплив полів зовнішнього біфіляра на процеси у внутрішньому індукторі повинен мати місце в низькочастотному режимі, коли просторова суперпозиція різноспрямованих індукованих струмів дає в сумі нульову величину електрорушійної сили індукції, що збуджується.

Подальші перспективи – перехід до експериментів для обґрунтування практичної дієздатності дослідженої індукторної системи.

Список літератури

1. Атабеков Г. И. *Основы теории цепей*. СПб.: Энергия, 2006. 220 с.
2. Padamanabhan K., Swaminathan P. *Electronic Components*. New Deli: Laxmi Publications, 2016. 204 p.
3. *Мир электроники. Датчики: справочное пособие*. Под ред. В. М. Шарипова и Е. С. Полищука. М: Техносфера, 2012. 624 с.
4. Yalçın O. *Ferromagnetic resonance – Theory and Applications* Intech Open Publ., 2013. 239 p.
5. Никишенко А. Н., Богач Н. В. Разработка модели излучения плоской катушки *Тезисы докладов 6-й Международной научно-технической конференции "Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций "RT-2010"* Севастополь, 2010. С. 362–366.
6. Ziegler S., Woodward R. C., Lu H. H. C., Borle L. J. Current Sensing Techniques: A Review. *IEEE Sensors Journal*. 2009. Vol. 9. 4. P. 354-376. doi: 10.1109/JSEN.2009.2013914.
7. Shneerson G. A., Dolotenko M. I., and Krivosheev S. I., *Strong and Superstrong Pulsed Magnetic Field Generation*. Berlin: Walter de Gruyter, 2014. 424 p.
8. Batygin Yu., Barbashova M., Sabokar O. *Electromagnetic Metal Forming for Advanced Processing Technologies*. Cham, Switzerland: Springer International Publishing AG, 2018. 95 p.
9. Батыгин Ю. В., Шиндерук С. О., Гаврилова Т. В., Балбекін І. А. Розрахункові співвідношення плоскої індукторної системи з масивними котушками біфіляра. *Вісник ХНАДУ*. 2019. 87. С. 85-90. doi: 10.30977/BUL.2219-5548.2019.87.0.85.
10. Батыгин Ю. В., Гаврилова Т. В., Шиндерук С. А., Чаплыгин Е. А., Саенко В. А. Плоская индукторная система с массивными катушками бифиляра. Анализ электромагнитных процессов. *Технічна інженерія*. 2019. №2 (84). С. 115-119.
11. Батыгин Ю. В., Шиндерук С. А., Чаплыгин Е. А., Еремина Е. Ф., Безродная А. В. Плоский круговой соленоид между массивными бифилярными катушками. Расчётные соотношения. *Вісник НТУ "ХПИ"*. *Математичне моделювання в техніці та технологіях*. 2019. № 22 (1347). С. 9-15.
12. Корн Г., Корн Т. *Справочник по математике (для научных работников и инженеров)*. М.: Наука, 1973. 832 с.
2. Padamanabhan K., Swaminathan P. *Electronic Components*. Laxmi Publications, 2016. 204 p.
3. *Mir elektroniki. Datchiki: spravocnoye posobiye* [The world of electronics. Sensors: a reference manual]. Pod red. V. M. Sharipova i Ye. S. Polishchuka. M: Tekhnosfera, 2012. 624 p.
4. Yalçın O. *Ferromagnetic resonance – Theory and Applications*. Intech Open Publ., 2013. 239 p.
5. Nikishenko A. N., Bogach N. V. Razrabotka modeli izlucheniya ploskoy katushki. [Development of a model of radiation of a flat coil.] *Tezisy dokladov 6-y Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Sovremennyye problemy radiotekhniki i telekommunikatsiy "RT-2010"* [Abstracts of the 6th International Scientific and Technical Conference "Modern Problems of Radio Engineering and Telecommunications "RT-2010"]. Sevastopol', 2010, pp. 362–366.
6. Ziegler S., Woodward R. C., Lu H. H. C., Borle L. J. Current Sensing Techniques: A Review. *IEEE Sensors Journal*, 2009, Vol. 9, 4, pp. 354-376, doi: 10.1109/JSEN.2009.2013914.
7. Shneerson G. A., Dolotenko M. I., and Krivosheev S. I., *Strong and Superstrong Pulsed Magnetic Field Generation*. Berlin. Walter de Gruyter, 2014. 424 p.
8. Batygin Yu., Barbashova M., Sabokar O. *Electromagnetic Metal Forming for Advanced Processing Technologies*. Cham, Switzerland. Springer International Publishing AG. 2018. 95 p.
9. Batyhin Yu. V., Shynderuk S. O., Gavrylova T. V., Balbekin I. A. Rozrakhunkovi spivvidnoshennya plaskoyi induktornoyi systemy z masyvnyimi kotushkamy bifilyara. [Calculated relations of flat inductor system with massive bifilar coils.] *Bulletin of KhNADU*, 2019, 87, pp. 85-90, doi: 10.30977/BUL.2219-5548.2019.87.0.85.
10. Batygin Yu. V., Gavrilova T. V., Shinderuk S. A., Chaplygin Ye. A., Sayenko V. A. Ploskaya induktornaya sistema s massivnyimi katushkami bifilyara. Analiz elektromagnitnykh protsessov. [Flat inductor system with massive bifilar coils. Analysis of electromagnetic processes.] *Technical engineering*, 2019, 2 (84), pp. 115-119.
11. Batygin Yu. V., Shinderuk S. A., Chaplygin Ye. A., Yeryomina Ye. F., Bezrodnaya A. V. Ploskiy krugovoy solenoid mezhd massivnyimi bifilyarnymi katushkami. Raschotnyye sootnosheniya. [Flat circular solenoid between massive bifilar coils. Design ratios]. *Bulletin of NTU "KhPI". Mathematical modeling in engineering and technology*, 2019, 22 (1347), pp. 9-15.
12. Korn T., Korn G. *Spravochnik po matematike (dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov)* [Mathematical Handbook for Scientists and Engineers]. Moscow, Nauka Publ., 1973. 832 p.

References (transliterated)

1. Atabekov G. I. *Osnovy teorii tsepey* [Fundamentals of the theory of chains]. SPb. Energiya, 2006. 220 p.

Відомості про авторів (About authors)

Батыгин Юрій Вікторович – доктор технічних наук, професор, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, завідувач кафедри фізики, м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-1278-5621; e-mail: yu.v.batygin@gmail.com.

Yuriy Batygin – Doctor of Science, Professor, Head of the Department of Physics, Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-1278-5621; e-mail: yu.v.batygin@gmail.com.

Ерьоміна Олена Федорівна – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, доцент кафедри фізики, м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-8123-1104; e-mail: elena.yeryomina@gmail.com.

Olena Yeryomina – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Assistant Professor, Department of Physics, Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-8123-1104; e-mail: elena.yeryomina@gmail.com.

Шиндерук Світлана Олександрівна – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, доцент кафедри фізики, м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-6354-4174; e-mail: s.shinderuk.2016102@ukr.net

Svitlana Shinderuk – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Assistant Professor, Department of Physics, Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-6354-4174; e-mail: s.shinderuk.2016102@ukr.net

Чапльгін Євген Олександрович – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, доцент кафедри фізики, м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0003-1448-6091; e-mail: chaplygin.e.a@gmail.com.

Evgeniy Chaplygin – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Assistant Professor, Department of Physics, Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0003-1448-6091; e-mail: chaplygin.e.a@gmail.com.

Бенсбаа Бадр Еддін – студент, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків, Україна; e-mail: badrbensbaa5@gmail.com

Bensbaa Badr Eddin – student, Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine; e-mail: badrbensbaa5@gmail.com

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Батигін Ю. В., Єрьоміна О. Ф., Шиндерук С. О., Чапльгін Є. О., Бенсбаа Б. Е. Плоский круговой соленоїд між масивними біфілярними котушками. Аналіз електромагнітних процесів. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2021. № 1 (7). С. 3-8. doi:10.20998/2413-4295.2021.01.01.

Please cite this article as:

Batygin Yu., Yeryomina O., Shinderuk S., Chaplygin E., Bensbaa B. E. Flat circular solenoid between massive bifilar coils. Analysis of electromagnetic processes. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2021, no. 1 (7), pp. 3-8, doi:10.20998/2413-4295.2021.01.01.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Батигин Ю. В., Ерёмина Е. Ф., Шиндерук С. А., Чапльгин Е. А. Бенсбаа Б. Е. Плоский круговой соленоид между массивными бифилярными катушками. Анализ электромагнитных процессов. *Вестник Национального технического университета «ХПИ»*. Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». 2021. № 1 (7). С. 3-8. doi:10.20998/2413-4295.2021.01.01.

АННОТАЦІЯ Представлены анализ и численные оценки индукционных эффектов в металле плоского кругового соленоида, расположенного между ветвями внешней бифилярной катушки в плоской индукторной системе, возбуждаемой однонаправленными токами в обмотках бифиляра. Такое устройство, конструктивное исполнение которого впервые было предложено ранее авторами настоящей работы, представляет практический интерес для схем оборудования магнитно-импульсной обработки металлов. Применение рассматриваемой индукторной системы дает возможность минимизировать влияние индукционных эффектов на электромагнитные процессы в металле внутреннего индуктора. Получены численные оценки для индуцированных токов, возбуждаемых в металле внутреннего кругового индуктора, размещённого между внешними обмотками бифилярной катушки. Показано, что в низкочастотном режиме действующих полей временная зависимость возбуждаемого тока есть производная от временной зависимости возбуждающего тока, а поперечное распределение тока в металле внутреннего индуктора представляет собой линейную зависимость, проходящую через центральную ось индуктора. В высокочастотном режиме действующих полей временная зависимость и радиальное распределение возбуждаемого тока совпадают с соответствующими аналогами для возбуждающего тока, а поперечное распределение индуцированного тока характерно для резкого поверхностного эффекта, когда индуцированный ток вытесняется на граничные поверхности металла. Доказано, что минимальное влияние полей внешнего бифиляра на электромагнитные процессы во внутреннем индукторе должно наблюдаться в низкочастотном режиме, когда пространственная суперпозиция разнонаправленных индуцированных токов даёт в сумме нулевую величину возбуждаемой электродвижущей силы индукции. Результаты анализа на основе проведенных конкретных вычислений направлены на поиск условий успешной технической реализации предложенной индукторной системы. Весьма перспективным в направлении последующих исследований видится создание работоспособных моделей предложенных индукторных систем и проведение экспериментов по определению реальных условий их максимальной эффективности.

Ключевые слова: бифилярная катушка; индукторная система; электромагнитные процессы; однонаправленные токи; пространственно-временная зависимость; численные оценки; расчетная модель

Надійшла (received) 01.03.2021

УДК 621.793.7

doi:10.20998/2413-4295.2021.01.02

ФОРМУВАННЯ КОМПОЗИЦІЙНИХ МЕТАЛОКЕРАМІЧНИХ ТА МЕТАЛОКАРБІДНИХ ЕЛЕКТРОДУГОВИХ ПОКРИТТІВ

А. А. КАРПЕЧЕНКО, М. М. БОБРОВ, О. М. ДУБОВИЙ, Т. О. МАКРУХА, Є. Ю. НЕДЕЛЬКО

кафедра матеріалознавства і технології металів, Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, м. Миколаїв, УКРАЇНА
e-mail: laborantmtm@gmail.com

АНОТАЦІЯ У роботі досліджено можливість формування композиційних металокерамічних ($Sv-08G2S-O-Al_2O_3$) та металокарбідних ($Sv-08G2S-O-TiC$) електродугових покриттів із застосуванням зміцнювальної фази у вигляді частинок порошку. Для цього застосовували модернізований ковпак розпилювальної голівки металізатора EM-14M, що оснащений вузлом безперебійної подачі порошку. Отримано лабораторну партію зразків на різних технологічних режимах напильнення. За допомогою растрового електронного мікроскопу досліджено мікроструктуру сформованих покриттів. Встановлено, що композиційні покриття характеризуються лускатою будовою та мають досить низьку пористість від 8 до 12% (залежно від режиму напильнення та вмісту зміцнювальної фази), у структурі добре диференціюються частинки різних фаз за їх відтінком. Ідентифікацію фаз проведено за показниками їх мікротвердості. Встановлено, що мікротвердість металевої матриці ($Sv-08G2S-O$) складає 1,8 ГПа, керамічних частинок Al_2O_3 – 17,1 ГПа, частинок TiC – 31,0 ГПа. Досліджено вплив технологічних параметрів напильнення, а саме: сили струму, напругу на дузі та витрати порошку на вміст зміцнювальної фази у структурі вказаних композиційних електродугових покриттів. Встановлено, що при використанні максимальних значень технологічних параметрів (сила струму 160 А, напруга 35 В і витрати порошку 35 г/хв), забезпечується отримання максимальної кількості зміцнювальної фази у покриттях: 10,3 % Al_2O_3 в металокерамічних та 25,6% TiC у металокарбідних. Значно більший вміст TiC у порівнянні зі вмістом Al_2O_3 у відповідних композиційних покриттях пояснюється вищою густиною карбіду та, як наслідок, підвищеною швидкістю даних частинок у високотемпературному гетерофазному струмені, а також кращою його змочуваністю рідким металом. Проведено експериментальні дослідження впливу вмісту зміцнювальної фази у композиційних покриттях на їх міцність зчеплення з основою. Показано, що максимальне значення міцності зчеплення металокерамічних покриттів складає 30 МПа та відповідає вмісту Al_2O_3 на рівні 8,7%. Щодо металокарбідних покриттів, то максимальне значення міцності зчеплення 32 МПа отримали при вмісті карбідної фази 18,4%. При цьому міцність зчеплення з основою покриття отриманого з дроту $Sv-08G2S-O$ становить 26 МПа. Підвищення вказаної характеристики для композиційних покриттів пояснюється додатковою активацією напильованої поверхні нерозплавленими твердими частинками Al_2O_3 та TiC. Показано, що міцність зчеплення зменшується при підвищенні вмісту Al_2O_3 до 10,3%, а TiC до 25,2%, що пояснюється значним зниженням фактичної площі контакту покриття з основою.

Ключові слова: електродугове напильнення; композиційні покриття; оксид алюмінію; карбід титану; міцність зчеплення; мікротвердість

FORMATION OF COMPOSITE METAL-CERAMIC AND METAL-CARBIDE ELECTRIC ARC SPRAYED COATINGS

A. KARPECHENKO, M.M BOBROV, O. DUBOVYY, T. MAKRUKHA, Ye. NEDELKO

Department of Material Science and technology of metals, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, UKRAINE

ABSTRACT The paper studies the possibility of forming composite metal-ceramic ($Sv-08G2S-O-Al_2O_3$) and metal-carbide ($Sv-08G2S-O-TiC$) electric arc sprayed coatings using a hardening phase in the form of powder particles in a free form. For this, a modernized cap of the spray head of an EM-14M electric arc spray gun was used, equipped with a unit for continuous powder feed supply. A laboratory batch of samples was obtained in various technological modes of spraying. Microstructures of the deposited coatings are investigated using a scanning electron microscope. It has been established that composite coatings are characterized by a lamellar structure and a rather low porosity from 8 to 12% (depending on the deposition mode and the hardening phase content), and phase particles of different shades are well differentiated in the structure. The phases were identified by their microhardness indicators. It has been established that the microhardness of the metal matrix ($Sv-08G2S-O$) is 1.88GPa, ceramic Al_2O_3 particles - 17.1GPa, TiC particles- 31GPa. The influence of the technological parameters of spraying, namely: current, voltage and powder consumption on the content of the hardening phase in the structure of the composite electric arc coatings has been investigated. It was found that when using the maximum values of technological parameters (current 160A, voltage 35V and powder consumption 35 g/min), the maximum content of the hardening phase in the coatings is obtained: 10.3% Al_2O_3 in metal-ceramic and 25.6% TiC in metal-carbide. The significantly higher maximum TiC content in comparison with the Al_2O_3 content in composite coatings is explained by the high density of carbide and, as a consequence, the increased velocity of these particles in the high-temperature heterophase jet. Experimental studies of the influence of the content of the strengthening phase in composite coatings on their bond strength to the substrate have been carried out. It is shown that the maximum value of the bond strength of metal-ceramic

coatings is 30 MPa and corresponds to the Al_2O_3 content of 8.7%. As for metal-carbide coatings, the maximum bond strength value of 32 MPa was obtained with a carbide phase content of 18.4%. At the same time, the bond strength of the convention coating sprayed of Sv-08G2S-O wire is 26 MPa. An increase in this characteristic for composite coatings is explained by the additional activation of the sprayed surface by unmelted solid particles of Al_2O_3 and TiC. It is shown that the decrease in bond strength with an increase in Al_2O_3 content to 10.3%, and TiC to 25.2% is explained by a significant decrease in the actual contact area of the coating with the substrate.

Keywords: electric arc spraying; composite coatings; aluminum oxide; titanium carbide; bond strength; microhardness

Вступ

Рівень розвитку машинобудування на початку ХХІ століття характеризується підвищеною інтенсивністю режимів експлуатації машин і механізмів. Зміна та ускладнення умов роботи вузлів і агрегатів вимагає постійного вдосконалення технології їх виготовлення із забезпеченням достатньої надійності та довговічності. Експлуатаційні властивості деталей та механізмів, а також ресурс їх роботи, визначаються переважно фізико-механічними властивостями поверхні. Як показує статистичний аналіз, більшість машин (85–90 %) виходять з ладу не через поломку, а у результаті зносу поверхонь окремих деталей. При відновленні зношених деталей останнім часом все частіше застосовують газотермічне напилення покриттів. Пояснюється це тим, що при усуненні зносу деталі, маса металу, що наноситься, зазвичай становить 2 – 4 %, а вартість ремонту не перевищує 10–40 % від вартості нової.

Однак покриття, отримані за традиційними технологіями напилення, не завжди забезпечують достатній рівень експлуатаційних властивостей для ефективної роботи деталей та механізмів у заданих умовах. Для вирішення даної проблеми останнім часом все частіше застосовують композиційні зносостійкі металокерамічні та металокарбідні відновлювальні покриття, що складаються з металеві матриці, в основному на основі сплавів нікелю, кобальту або заліза, і зміцнювальної фази, головним чином оксидної кераміки або карбідів. Також протягом останнього десятиліття у практиці газотермічного напилення проводяться дослідження, направлені на створення композиційних покриттів з ультрадисперсними складовими, що забезпечують отримання комплексу підвищених фізико-механічних та експлуатаційних властивостей (зносостійкості, корозійної та ерозійної стійкості, жароміцності). Для отримання таких композиційних покриттів застосовують в основному газополумене [1], атмосферне плазмове [2], високошвидкісне газополумене [3] або холодне газодинамічне напилення [4,5]. До недоліків покриттів, нанесених зазначеними методами, слід віднести їх високу собівартість, пов'язану із застосуванням горючих та інертних газів; дорогих плакованих або отриманих механічним легуванням порошоків; обов'язкове використання дорогого устаткування для нанесення; високі вимоги до кваліфікації робітників.

Серед усіх методів газотермічного напилення слід приділити увагу електродуговому методу, який є

найбільш простим і технологічним, не потребує дорогого обладнання, має високі коефіцієнти використання матеріалу і енергетичний ККД, які можуть досягати 0,7...0,9; характеризується найбільшою продуктивністю. Відносна вартість напилених покриттів в 3 - 10 разів нижча, ніж при нанесенні іншими газотермічними методами при забезпеченні їх високої міцності. Основними недоліками цього методу є: застосування в якості розпилюваного матеріалу тільки електропровідних дротів, невисокі міцнісні характеристики покриттів, що обмежує можливості застосування даного методу.

Одним зі способів формування композиційних електродугових покриттів є розпилення двох або трьох дротів з різних матеріалів суцільного перерізу [6]. Такі псевдосплавні покриття характеризуються високими механічними, трибологічними і корозійностійкими властивостями за рахунок отримання щільної структури покриття, підвищеної адгезійної і когезійної міцності. Істотним недоліком псевдосплавних покриттів є те, що їх отримують тільки зі струмопровідних дротів. При використанні прутків як розпилюваного матеріалу порушується безперервність процесу, що призводить до зниження службових властивостей.

Також для формування композиційних електродугових покриттів використовують порошоків дрони різноманітних складів [7–9]. За рахунок цього можливо широко варіювати хімічний склад покриттів, різко розширювати сферу їх використання, а також у багатьох випадках отримувати покриття з властивостями на рівні кращих плазмових і надзвукових газотермічних покриттів, але в 5...10 разів дешевше. Однак застосування порошкового дроту при напиленні призводить до підвищеної пористості, що негативно впливає на комплекс фізико-механічних властивостей покриттів. При цьому значно підвищується їх вартість у порівнянні з покриттями з суцільного дроту. Також для зносостійких композиційних покриттів характерний високий рівень залишкових напружень, який викликає появу мікро- і макротріщин, а також недостатню когезійну і адгезійну міцність. Особливо це характерно для відновлювальних покриттів значної товщини, які у процесі механічної обробки необхідно шліфувати під ремонтні розміри.

Мета роботи

Дослідження можливості нанесення композиційних металокерамічних та металокарбідних електродугових покриттів із застосуванням

зміцнювальної фази у формі частинок порошку у вільному вигляді і визначення їх фізико-механічних і експлуатаційних властивостей.

Виклад основного матеріалу

Об'єктом досліджень обрані електродугові металокерамічні та металокарбідні композиційні покриття, отримані шляхом розпилення дроту марки Св-08Г2С-О і порошок оксиду алюмінію Al_2O_3 та карбіду титану TiC на основу, виготовлену із вуглецевої конструкційної якісної сталі 45.

Порошок оксиду алюмінію та карбіду титану перед напиленням просушували в сушильній шафі ШСВ 3,5.3.5.6/3,5 за температури $150^{\circ}C$ протягом 3 годин. Ситову класифікацію порошоків проводили на лабораторній установці модель 029, використовуючи сітку номерів 004 і 008 за ГОСТ 6613-86. В результаті просіювання отримано порошок фракцією 40...80 мкм, який і застосовувався для отримання композиційних електродугових покриттів.

Для напилення композиційних електродугових покриттів використовували установку КДМ-2, укомплектовану апаратом ЕМ-14М з модернізованим ковпаком розпилювальної голівки, що оснащений вузлом безперервної подачі порошку [10]. Даний вузол включає в себе бункер з дозуючим пристроєм, вихід якого розміщено в основному робочому бронзовому соплі з кільцевою камерою і транспортувальними соплами для подачі порошку за рахунок атмосферної інжекції, виходи яких розміщені під гострим кутом до осі високотемпературного струменя і направлені у бік напилюваної поверхні. Отвір основного робочого сопла, з якого відбувається витікання робочого стисненого газу, має менший діаметр, ніж отвір, з якого виходять транспортувальні сопла для подачі порошку. Сопло встановлено в ізоляторі і притиснуто захисним екраном до ковпака. Захисний екран також містить кільцеву камеру з соплами, виходи яких розміщені під гострим кутом до осі струменя і направлені у бік напилюваної поверхні, через які подається стиснутий газ. За рахунок модернізації забезпечується можливість регулювання у широкому діапазоні концентрації порошкових частинок у високотемпературному струмені й, відповідно, у композиційному електродуговому покритті. Підвищується якість отриманого покриття за рахунок збільшення швидкості часток у високотемпературному струмені та зменшення кута його розкривання, що приводить до підвищення коефіцієнту використання матеріалу при напиленні.

Для запобігання налипанню розплавлених частинок на бронзове робоче сопло використовували дріт діаметром 1,2 мм.

Підготовку поверхні зразків, безпосередньо перед напиленням, здійснювали за допомогою установки струменево-абразивної обробки марки 026-7 «Ремдеталь». Як абразив використовували електрокорунд марки 7Б, шліф зерно номер 125.

Струменево-абразивну обробку поверхні, призначену під напилення, проводили у наступному технологічному режимі:

- Тиск стисненого повітря, МПа.....0,4–0,6
- Відстань від зрізу сопла до оброблюваної поверхні, мм.....100–150
- Діаметр сопла, мм.....12
- Кут падіння струменя на оброблювану поверхню, град60–90
- Лінійна швидкість переміщення пістолета, мм /хв.....50–400

Обробка проводилася в кілька проходів.

Контроль якості обробленої поверхні проводився візуально. Оброблена поверхня сталевих пластин і зразків, призначених для дослідження мікроструктури та визначення міцності зчеплення покриттів з основою відповідно, після струменево-абразивної обробки мала сірувато-матовий відтінок. Величина шорсткості обробленої поверхні складала $R_z = 38...75$ мкм.

Напилення композиційних покриттів здійснювали на пластини з вуглецевої сталі 45 розміром $50 \times 20 \times 5$ мм. Зазначена сталь призначена для виготовлення втулок, шестерень, колінчастих і розподільних валів, шпинделів, бандажів, циліндрів, штоків і т.п.

Товщину покриттів визначали вимірами зразків до і після напилення штангенциркулем. Товщина напилених покриттів становила 1,5...2,0 мм.

Для дослідження мікроструктури композиційних покриттів виготовлялися мікрошліфи. Металографічні дослідження проводили на скануючому електронному мікроскопі-мікроаналізаторі РЕММА 102-02 (Св-08Г2С-О- Al_2O_3) та ZEISS Gemini SEM 500 (Св-08Г2С-О- TiC). Ідентифікацію фаз і вимір мікротвердості у композиційних електродугових покриттях здійснювали за допомогою мікротвердоміра ПМТ-3 на поперечних шліфах при навантаженні на індентор 50 г.

Критеріями якості нанесеного композиційного електродугового покриття служили: мінімальні показники пористості; кількість несучільностей на границі розділу покриття – основа; їх мікротвердість.

Показники пористості, кількість несучільностей на границі розділу покриття – основа та кількість наповнювача визначали за допомогою комп'ютерного металографічного аналізу із застосуванням методів стереометричної металографії, а саме планіметричного методу.

У даній роботі для визначення міцності зчеплення покриттів з основою використовували штифтовий метод, оскільки він дозволяє оперативно проводити випробування безпосередньо після їхнього нанесення на зразки (рис.1), які також виготовляли з вуглецевої конструкційної якісної сталі 45.

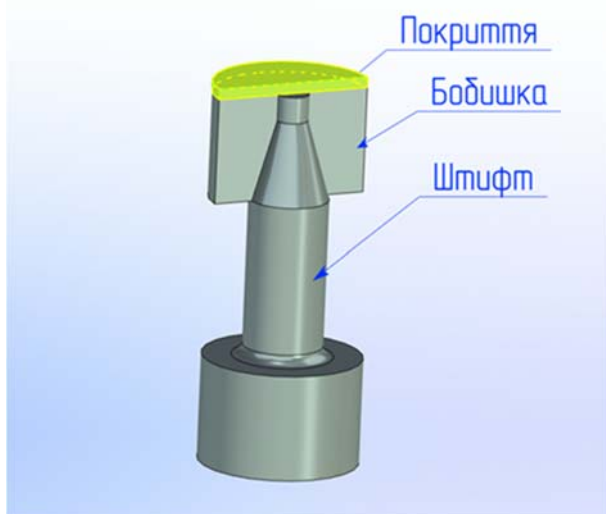


Рис. 1 – Зразок для визначення міцності зчеплення покриттів з основою

Перед нанесенням покриттів, поверхню, що підлягає напиленню, знежирювали технічним етанолом і піддавали струменево-абразивній обробці. Товщина нанесених покриттів, на зразках призначених для випробувань міцності зчеплення з основою, не перевищувала 0,8...1,0 мм. Для отримання результатів міцності зчеплення покриттів з основою і виключення впливу їх пористості на дану характеристику напилення на одному і тому ж режимі виконували в один прохід на 5 зразків одночасно (5 зразків без наповнювача, 5 – з відповідним наповнювачем). Міцність зчеплення композиційних металокерамічних та металокарбідних покриттів з основою визначали на розривній машині УММ-5.

Обговорення результатів

За допомогою електродугового вдосконаленого апарата ЕМ-14М отримана лабораторна партія зразків з різним вмістом зміцнювальної фази в композиційних покриттях.

Режими нанесення металокерамічних та металокарбідних покриттів вибирали експериментально. Силу струму змінювали від 80 до 160 А, напруга на дузі становила 35 – 40 В, витрати порошку 25 – 35 г/хв, тиск стисненого повітря 0,4 – 0,6 МПа, дистанція напилення 80 мм.

При силі струму менше 80 А і подачі керамічного та карбідного порошку в зону дугового розряду, горіння електричної дуги стає нестійким. Виникаючі пульсації електричної дуги призводять до утворення на напилюваній поверхні краплеподібних частинок. При збільшенні сили струму понад 160 А спостерігається поділ потоку розплавлених частинок металу на два, з кожного дроту-електроду, що приводить до зменшення вмісту керамічних та

карбідних частинок в композиційних покриттях і погіршує їх якість.

Підвищена напруга при нанесенні композиційних покриттів призводить до збільшення ентальпії частинок розплавленого металу, що збільшує вміст частинок наповнювача у відповідному покритті та їх міцність зчеплення з основою.

Збільшення тиску стисненого повітря позитивно впливає на процес нанесення композиційних покриттів так, як досягається велика ступінь інжекції керамічного та карбідного порошку в високотемпературний струмінь і збільшується їх швидкість, що призводить до підвищеного вмісту наповнювача в покритті. Евакуйований розплавлений метал, з торців дротів-електродів, диспергується на більш дрібні частинки, покращуючи якість сформованих покриттів.

Дистанцію напилення обрали на рівні 80 мм виходячи з припущення, що тугоплавка частка зміцнювальної за час проходження високотемпературної зони дугового розряду і всієї подальшої дистанції напилювання не розплавиться, а досягнувши високої швидкості, при зіткненні з закріпленими ще пластичними частинками металу, закріпиться у покритті.

Зроблене припущення підтвердилося експериментально. При дистанції напилювання менше 80 мм відбувся перегрів підкладки, що супроводжувалося стіканням розплавленого металу із зразка. При дистанції напилювання більше 80 мм непроплавлені частки зміцнювальної фази не закріплюються в мікронерівностях підкладки та наступних шарів покриття, а відскакують від них, що приводить до зменшення їх вмісту у покритті.

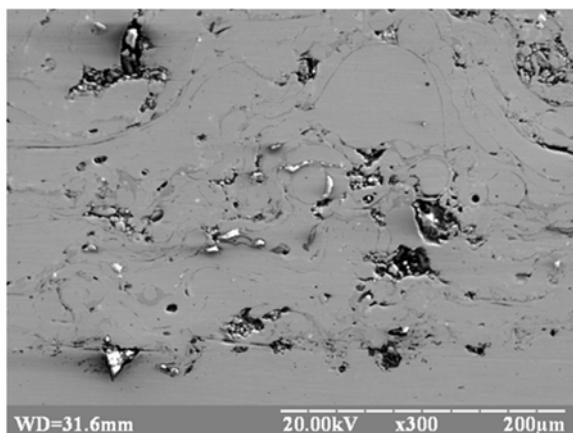
На рис. 2 представлені мікроструктури металокерамічних та металокарбідних електродугових покриттів, отриманих при силі струму 120А і напрузі на дузі 30В на різних збільшеннях.

Комп'ютерний металографічний аналіз наведених мікроструктур показав, що електродугові композиційні покриття мають досить низьку пористість, яка становить близько 8 %, в структурі добре диференціюються частинки різних фаз, які відрізняються відтінками. Для металокерамічного покриття системи Св-08Г2С-О – Al_2O_3 : світла фаза (імовірно оксид алюмінію) та сіра (Св-08Г2С-О); для металокарбідного покриття системи Св-08Г2С-О – ТіС: темна (імовірно карбід титану) і сіра (Св-08Г2С-О) фази.

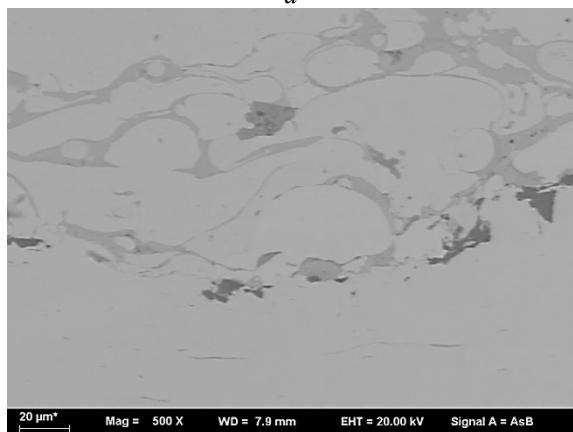
Ідентифікацію фаз у композиційних електродугових покриттях проводили шляхом вимірювання їх мікротвердості. Приклад знімків індентора на різних фазах металокерамічного композиційного електродугового покриття наведено на рис. 3.

Мікротвердість сірої фази (металевої матриці) для обох покриттів склала 1,88 ГПа, а світлої (керамічних частинок Al_2O_3) – 17,1 ГПа. Мікротвердість Al_2O_3 за даними роботи [11] дорівнює

17,0 ГПа. Мікротвердість темної фази (частинок TiC) - 31 ГПа, що відповідає мікротвердості карбіду титану згідно з літературними даними [12].



а



б

Рис. 2 – Мікроструктури металокерамічного Cv-08Г2С-О – Al₂O₃ (а) та металокарбідного Cv-08Г2С-О - TiC покриттів (б)

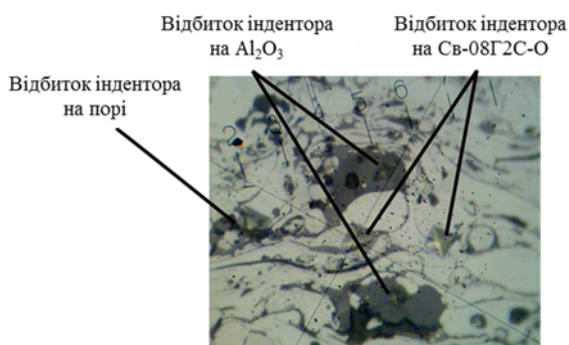


Рис. 3 – Знімок відбитків індентора на різних фазах металокерамічного композиційного електродугового покриття (Cv-08Г2С-О – Al₂O₃) при визначенні мікротвердості

Для отримання максимального рівня фізико-механічних та експлуатаційних властивостей композиційних електродугових покриттів необхідно управляти технологічними режимами напильня, забезпечуючи заданий зміст зміцнювальної фази у

відповідних покриттях. Як наслідок, залежно від умов експлуатації виробу і вимог, що пред'являються до покриття, для кожного конкретного випадку режим електродугового напильня підбирається експериментально. Аналізуючи попередні дослідження [13] про вплив технологічних параметрів електродугового напильня на якість одержуваних покриттів як найбільш значущі обрали: силу струму, напругу на дузі та витрати порошку. Визначення вмісту зміцнювальної фази проводили за допомогою планіметричного методу за отриманими знімками мікроструктури. У табл. 1 наведено рівні варіювання зазначених технологічних параметрів і відповідно кількість отриманої зміцнювальної фази у покриттях.

Таблиця 1 – Рівні варіювання технологічних параметрів напильня і кількість зміцнювальної фази у структурі композиційних електродугових покриттів

| Сила струму, А | Напруга, В | Витрати порошку, г/хв | Кількість Al ₂ O ₃ в покритті, % (об.) | Кількість TiC в покритті, % (об.) |
|----------------|------------|-----------------------|--|-----------------------------------|
| 80 | 25 | 25 | 6,9 | 12,1 |
| 120 | 30 | 30 | 8,7 | 18,5 |
| 160 | 35 | 35 | 10,3 | 25,6 |

Аналізуючи наведені дані, очевидно, що вміст зміцнювальної фази в обох електродугових композиційних покриттях інтенсивно збільшується з підвищенням сили струму, напруги та витрат порошку. При підвищенні сили струму і напруги збільшується продуктивність процесу, що призводить до збільшення концентрації розплавлених частинок металу в струмені, їх ентальпії і, отже, вмісту наповнювача в покритті. При збільшенні витрат порошку, збільшується концентрація твердих порошкових частинок у високотемпературному струмені, що також призводить до підвищення вмісту Al₂O₃ та TiC в покриттях. Використання максимальних значень технологічних параметрів, сила струму 160А, напруга 35В і витрата порошку 35 г/хв, забезпечило отримання 10,3 % Al₂O₃ в металокерамічних та 25,6% TiC в металокарбідних покриттях. Однак при цьому спостерігається підвищення пористості покриттів, в тому числі і на границі покриття-основа. Значно більший максимальних вміст TiC у порівнянні з вмістом Al₂O₃ в відповідних композиційних покриттях пояснюється вищою густиною карбіду та кращою його змочуваністю рідким металом, як наслідок, підвищеною інерційністю даних частинок за рахунок чого більш значна їх кількість досягає основи та закріплюється у покритті.

Результати визначення міцності зчеплення напильних покриттів наведено на рис. 4.

Згідно з представленими даними, залежність міцності зчеплення з основою від вмісту зміцнювальної фази в покритті носить екстремальний характер. Міцність зчеплення покриття з дроту Cv-08Г2С-О

становить 26 МПа. Максимальне значення міцності зчеплення (30МПа) отримали в металокерамічному покритті при вмісті Al_2O_3 8,7%. Щодо металокарбідних покриттів, то максимальне значення міцності зчеплення (32МПа) отримали при вмісті карбідної фази 18,4%. Оскільки частки оксиду алюмінію та карбиду титану мають досить високу температуру плавлення і твердість, підвищення міцності зчеплення композиційних покриттів з основою, ймовірно пов'язано з тим, що нерозплавлені частинки Al_2O_3 та TiC, вдарюючись з поверхнею основи, додатково її активують за рахунок своєї високої кінетичної енергії, а співударюючись з вже закріпленими пластичними металевими частинками вбивають їх у мікронерівності поверхні основи і наступних шарів покриття. Зниження зазначеної характеристики при підвищенні вмісту Al_2O_3 до 10,3% а TiC до 25,6% пояснюється значним зниженням фактичної площі контакту частинок з основою (рис. 5), що збільшує результуюче навантаження на одиницю площі нанесеного покриття.

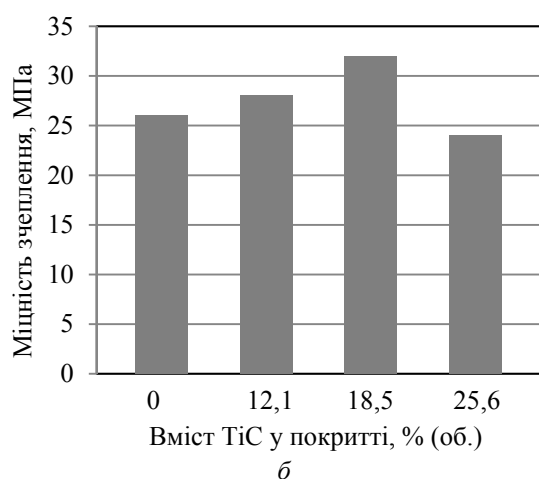
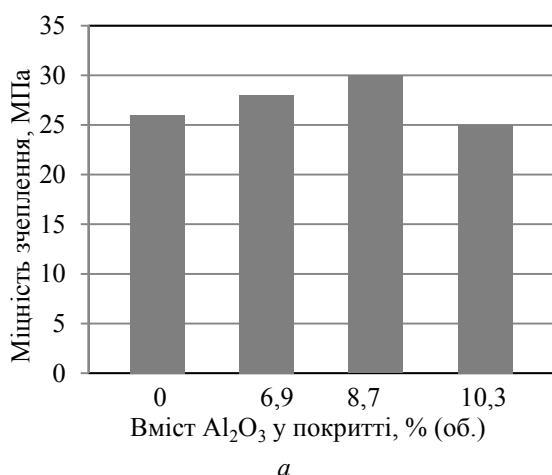


Рис. 4 – Результати визначення міцності зчеплення композиційних електродугових покриттів з різним вмістом зміцнюючої фази: а - Sv-08Г2С-О - Al_2O_3 ; б - Sv-08Г2С-О - TiC

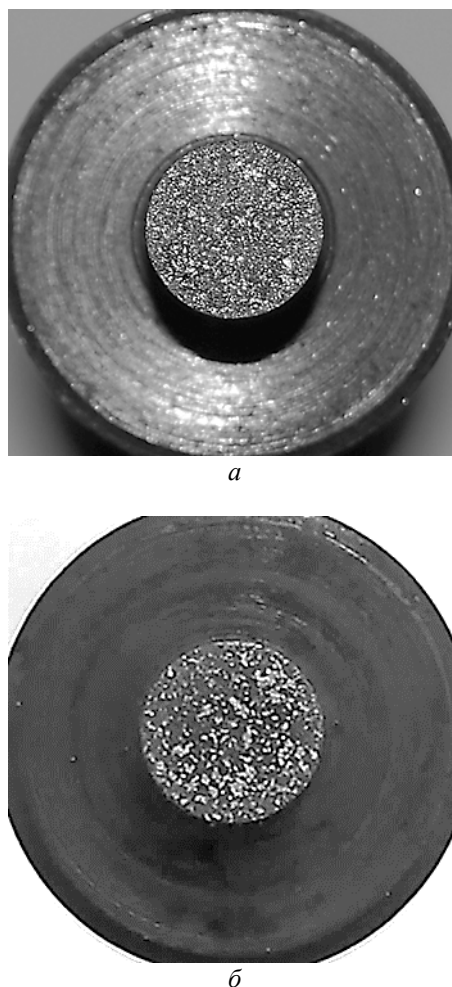


Рис. 5 – Зразки після випробувань на міцність зчеплення металокерамічних електродугових покриттів: а – 18,5% (об.) TiC; б – 25,6% (об.) TiC

Таким чином, виходячи з результатів досліджень з визначення міцності зчеплення, можна зробити висновок, що оптимальний вміст Al_2O_3 у металокерамічних покриттях складає 8,7% (об.); в металокарбідних – 18,5% (об.) TiC. При цьому такі покриття будуть мати максимальну міцність зчеплення з основою.

Висновки

Сформовано електродугові композиційні металокерамічні покриття системи Sv-08Г2С-О - Al_2O_3 та металокарбідні системи Sv-08Г2С-О - TiC з використанням порошку зміцнювальної фази у вільному вигляді за рахунок застосування вдосконаленого електродугового апарату EM-14M.

Визначено мікротвердість різних фаз у сформованих композиційних покриттях. Мікротвердість металеві матриці для обох покриттів склала 1,88 ГПа; керамічних частинок Al_2O_3 – 17,1 ГПа; частинок TiC – 31 ГПа.

Визначено вплив технологічних параметрів напилення на кількість зміцнювальної фази (Al_2O_3 , TiC) в структурі композиційних покриттів: при підвищенні сили струму, напруги та витрат порошку кількість Al_2O_3 , TiC збільшується. Використання максимальних значень технологічних параметрів, сила струму 160А, напруга 35В і витрата порошку 35 г/хв, забезпечило отримання максимальної кількості зміцнювальної фази у покриттях: 10,3 % Al_2O_3 в металокерамічних та 25,6% TiC в металокарбідних.

Встановлено, що залежність міцності зчеплення композиційних електродугових покриттів від вмісту зміцнювальної фази носить екстремальний характер з вираженим максимумом. Максимальне значення міцності зчеплення металокерамічних покриттів (30МПа) отримали при вмісті Al_2O_3 8,7%. Щодо металокарбідних покриттів, то максимальне значення міцності зчеплення (32МПа) отримали при вмісті карбідної фази 18,4 %, що пояснюється додатковою активацією напилюваної поверхні твердими частинками Al_2O_3 та TiC. При підвищенні вмісту Al_2O_3 до 10,3 % а TiC до 25,2 % спостерігається зниження вище зазначеної характеристики покриття за рахунок суттєвого зменшення фактичної площі контакту частинок покриття з основою.

Список літератури

1. Huang J., Liu Y., Yuan J., Li H. Al/ Al_2O_3 Composite Coating Deposited by Flame Spraying for Marine Applications: Alumina Skeleton Enhances Anti-Corrosion and Wear Performances. *Journal of Thermal Spray Technology*. 2014. Vol. 23. P. 676–683. doi: 10.1007/s11666-014-0056-7.
2. Cao Y., Huang C., Liu W., Zhang W., Du L. Effects of Boron Carbide Content on the Microstructure and Properties of Atmospheric Plasma-Sprayed NiCoCrAlY/ Al_2O_3 -B₄C Composite Coatings. *Journal of Thermal Spray Technology*. 2014. Vol. 23. P. 716–724. doi:10.1007/s11666-014-0061-x.
3. Bai M., Song B., Reddy L., Hussain T. Preparation of MCrAlY- Al_2O_3 Composite Coatings with Enhanced Oxidation Resistance through a Novel Powder Manufacturing Process. *Journal of Thermal Spray Technology*. 2019. Vol. 28. P. 433–443. doi: 10.1007/s11666-019-00830-y.
4. Zhang L., Yang S., Lv X., Jie X. Wear and Corrosion Resistance of Cold-Sprayed Cu-Based Composite Coatings on Magnesium Substrate. *Journal of Thermal Spray Technology*. 2019. Vol. 28. P. 1212–1224. doi: 10.1007/s11666-019-00887-9.
5. Winnicki M., Małachowska A., Piwowarczyk T., Rutkowska-Gorczyca M., Ambroziak A. The bond strength of Al+ Al_2O_3 cermet coatings deposited by low-pressure cold spraying. *Surface and coatings technology*. 2016. Vol. 16. P. 743–752. doi: 10.1016/j.acme.2016.04.014.
6. Wang J., Wang G., Liu J., Zhang L., Wang W., Li Z. Microstructure of Ni-Al powders and Ni-Al composite coatings prepared by twin-wire arc spraying. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*. 2016. Vol. 23. P. 810–818. doi: 10.1007/s12613-016-1295-z.

7. Cheng J., Ge Y., Wang B., Zhang L., Hu X., Hong S., Liang X., Zhang X. Microstructure and Tribocorrosion Behavior of Al_2O_3 /Al Composite Coatings: Role of Al_2O_3 Addition. *Journal of Thermal Spray Technology*. 2020. Vol. 29. P. 1741–1751. doi:10.1007/s11666-020-01062-1.
8. Wielage B., Pokhmurska H., Student M., Gvozdeckii V., Stupnyckij T., Pokhmurskii V. Iron-based coatings arc-sprayed with cored wires for applications at elevated temperatures. *Surface and coatings technology*. 2013. Vol. 27. P. 27–35. doi: 10.1016/j.surfcoat.2012.12.013.
9. Похмурский В.И., Студент М.М., Гвоздецкий В.М., Похмурская А.В. Порошковые проволоки серии ФМИ для электродугового напиления покрытий. *Автоматическая сварка*. 2011. № 9. С. 52–57.
10. Дубовий О.М., Карпеченко А.А., Бобров М.М., Мазуренко А.О. Пат. 111760 Україна, МПК С23С 26/02, В05В 7/22. Пристрій для електродугового напилення композиційних покриттів. – а 2014 07318; заявл. 01.07.2014; опубл. 10.06.2016, Бюл. №11.
11. Lysenko V., Mali V., Anisimov A. Microhardness of Ceramics Obtained by Different Methods from Nanopowders of Different Oxides. *Athens Journal of Sciences*. 2014. Vol. 1. P. 269–280. doi: 10.30958/ajs.1-4-4.
12. Shackelford J., Han Y., Kim S., Kwon S. *CRC materials science and engineering handbook* 4th Edition. CRC press, 2015. 644 p. doi:10.1201/9781420038408.
13. Dubovoj A.N., Prokudin S.A., Karpechenko A.A. Manufacture of coatings with mixed compositions by means of powder arc spraying using a facility developed specifically for this purpose. *Thermal spray bulletin*. 2013. Vol. 2. P. 102–107.

References (transliterated)

1. Huang J., Liu Y., Yuan J., Li H. Al/ Al_2O_3 Composite Coating Deposited by Flame Spraying for Marine Applications: Alumina Skeleton Enhances Anti-Corrosion and Wear Performances. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2014, Vol. 23, pp. 676–683, doi: 10.1007/s11666-014-0056-7.
2. Cao Y., Huang C., Liu W., Zhang W., Du L. Effects of Boron Carbide Content on the Microstructure and Properties of Atmospheric Plasma-Sprayed NiCoCrAlY/ Al_2O_3 -B₄C Composite Coatings. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2014, Vol. 23, pp. 716–724, doi:10.1007/s11666-014-0061-x.
3. Bai M., Song B., Reddy L., Hussain T. Preparation of MCrAlY- Al_2O_3 Composite Coatings with Enhanced Oxidation Resistance through a Novel Powder Manufacturing Process. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2019, Vol. 28, pp. 433–443, doi: 10.1007/s11666-019-00830-y.
4. Zhang L., Yang S., Lv X., Jie X. Wear and Corrosion Resistance of Cold-Sprayed Cu-Based Composite Coatings on Magnesium Substrate. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2019, Vol. 28, pp. 1212–1224, doi: 10.1007/s11666-019-00887-9.
5. Winnicki M., Małachowska A., Piwowarczyk T., Rutkowska-Gorczyca M., Ambroziak A. The bond strength of Al+ Al_2O_3 cermet coatings deposited by low-pressure cold spraying. *Surface and coatings technology*, 2016, Vol. 16, pp. 743–752, doi: 10.1016/j.acme.2016.04.014.
6. Wang J., Wang G., Liu J., Zhang L., Wang W., Li Z. Microstructure of Ni-Al powders and Ni-Al composite coatings prepared by twin-wire arc spraying. *International*

- Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 2016, Vol. 23, pp. 810–818, doi: 10.1007/s12613-016-1295-z.
7. Cheng J., Ge Y., Wang B., Zhang L., Hu X., Hong S., Liang X., Zhang X. Microstructure and Tribocorrosion Behavior of Al₂O₃/Al Composite Coatings: Role of Al₂O₃ Addition. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2020, Vol. 29, pp. 1741–1751, doi: 10.1007/s11666-020-01062-1.
 8. Wielage B., Pokhmurska H., Student M., Gvozdeckii V., Stupnyckij T., Pokhmurskii V. Iron-based coatings arc-sprayed with cored wires for applications at elevated temperatures. *Surface and coatings technology*, 2013, Vol. 27, pp. 27–35, doi: 10.1016/j.surfcoat.2012.12.013.
 9. Pohmurskiy V.I. Student M.M., Hvozdetzkyi V.M., Pokhmurskaia A.V. Poroshkovyie provoloki serii FMI dlya elektrodugovogo napyleniya pokrytiy [FMI series flux-cored wires for electric arc spraying]. *Avtomaticheskaya svarka [Automatic welding]*, 2011, no. 9, pp. 52–57.
 10. Dubovyi O.M., Karpechenko A.A., Bobrov M.M., Mazurenko A.O. Pat. 111760 Ukraine, MPK C23C 26/02, B05B 7/22, *Prystrii dlia elektroduhovoho napylennia kompozytsiinykh pokryttiv [Device for electric arc spraying of composite coatings]*, a 2014 07318; declared. 01.07.2014; publ. 10.06.2016, Bull. №11.
 11. Lysenko V., Mali V., Anisimov A. Microhardness of Ceramics Obtained by Different Methods from Nanopowders of Different Oxides, *Athens Journal of Sciences*, 2014, Vol. 1, p. 269–280, doi: 10.30958/ajs.1-4-4.
 12. Shackelford J., Han Y., Kim S., Kwon S. *CRC materials science and engineering handbook*, 2015, 644 p., doi: 10.1201/9781420038408.
 13. Dubovoj A.N., Prokudin, S.A., Karpechenko, A.A. Manufacture of coatings with mixed compositions by means of powder arc spraying using a facility developed specifically for this purpose. *Thermal spray bulletin*, 2013, Vol. 2, pp. 102–107.

Відомості про авторів (About authors)

Карпеченко Антон Анатолійович – кандидат технічних наук, доцент, Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, доцент кафедри матеріалознавства і технології металів, м. Миколаїв, Україна; ORCID:0000-0002-7543-4159; e-mail: karpechenkoanton@gmail.com.

Anton Karpechenko – Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Docent, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Docent of Department Material science and technology of metals, Mykolaiv, Ukraine; ORCID:0000-0002-7543-4159; e-mail: karpechenkoanton@gmail.com.

Бобров Максим Миколайович – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, м. Миколаїв, Україна; ORCID: 0000-0002-9098-6912; e-mail: laborantmtm@gmail.com.

Maksym Bobrov - Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Senior Research Fellow, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-9098-6912; e-mail: laborantmtm@gmail.com.

Дубовий Олександр Миколайович – доктор технічних наук, професор, Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, завідувач кафедри матеріалознавства і технології металів, м. Миколаїв, Україна; ORCID: 0000-0002-2843-1879; e-mail: oleksandr.dubovyy@nuos.edu.ua

Oleksander Dubovyy – Doctor of Technical Sciences, Professor, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Head of the Department of Materials science and technology of metals, Mykolaiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-2843-1879; e-mail: oleksandr.dubovyy@nuos.edu.ua

Макруха Тетяна Олександрівна – кандидат технічних наук, провідний фахівець кафедри матеріалознавства і технології металів, Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, м. Миколаїв, Україна; ORCID: 0000-0001-8841-1688; e-mail: tmakruha@gmail.com.

Tetiana Makruha - Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Senior Specialist of Department Materials science and technology of metals, Mykolaiv, Ukraine; ORCID: 0000-0001-8841-1688; e-mail: tmakruha@gmail.com.

Неделько Євген Юрійович – кандидат технічних наук, доцент, Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, доцент, завідувач кафедри вищої математики, м. Миколаїв, Україна; ORCID:0000-0003-3557-3717; e-mail: enedelko52@gmail.com.

Yevhen Nedelko – Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Docent, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Head of the Department of Higher Mathematics, Mykolaiv, Ukraine; ORCID: 0000-0003-3557-3717; e-mail: enedelko52@gmail.com.

Будь ласка посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Карпеченко А. А., Бобров М. М., Дубовий О. М., Макруха Т. О., Неделько Є. Ю. Формування композиційних металокерамічних та металокарбідних електродугових покриттів. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*, Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. Харків: НТУ «ХПІ». 2021. № 1 (7). С. 9-17. doi:10.20998/2413-4295.2021.01.02.

Please cite this article as:

Karpechenko A., Bobrov M., Dubovyy A., Makruha T. Nedelko E. Formation of composite metal-ceramic and metal-carbide electric arc sprayed coatings. *Bulletin of the National Technical University “KhPI”. Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU “KhPI”, 2021, no. 1 (7), pp. 9-17, doi:10.20998/2413-4295.2021.01.02.

Пожалуйста ссылаетесь на эту статью следующим образом:

Карпеченко А. А., Бобров М. Н., Дубовой А. Н., Макруха Т. А., Неделько Е. Ю. Формирование композиционных металлокерамических и металлокарбидных электродуговых покрытий. *Вестник Национального технического университета «ХПИ»*, Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». 2021. № 1 (7). С. 9-17. doi:10.20998/2413-4295.2021.01.02.

АННОТАЦИЯ В работе исследована возможность формирования композиционных металлокерамических (Св-08Г2С-О- Al_2O_3) и металлокарбидных (Св-08Г2С-О-ТiС) электродуговых покрытий с применением упрочняющей фазы в виде частиц порошка. Для этого применяли модернизированный колпак распылительной головки металлатора ЭМ-14М оснащенный узлом бесперебойной подачи порошка. Получено лабораторную партию образцов на различных технологических режимах напыления. С помощью растрового электронного микроскопа исследована микроструктура сформированных покрытий. Установлено, что композиционные покрытия характеризуются чешуйчатым строением и достаточно низкой пористостью от 8 до 12% (в зависимости от режима напыления и содержания упрочняющей фазы), в структуре хорошо дифференцируются фазы, которые имеют различные оттенки. Идентификацию фаз осуществляли по показателям их микротвердости. Установлено, что микротвердость металлической матрицы (Св-08Г2С-О) составляет 1,8 ГПа, керамических частиц Al_2O_3 - 17,1 ГПа, частиц ТiС – 31,0 ГПа. Исследовано влияние технологических параметров напыления, а именно: силы тока, напряжения на дуге и расхода порошка на содержание упрочняющей фазы в структуре указанных композиционных электродуговых покрытий. Установлено, что при использовании максимальных значений технологических параметров (сила тока 160 А, напряжение 35 В и расход порошка 35 г/мин), обеспечивается получение максимального количества упрочняющей фазы в покрытиях: 10,3% Al_2O_3 в металлокерамических и 25,6% ТiС в металлокарбидных. Значительно большее максимальное содержание ТiС по сравнению с содержанием Al_2O_3 в композиционных покрытиях объясняется высокой плотностью карбида и, как следствие, повышенной скоростью данных частиц в высокотемпературной гетерофазной струе, а также лучшей его смачиваемостью жидким металлом. Проведены экспериментальные исследования влияния содержания упрочняющей фазы в композиционных покрытиях на их прочность сцепления с основой. Показано, что максимальное значение прочности сцепления металлокерамических покрытий составляет 30 МПа при содержании Al_2O_3 на уровне 8,7%. Что касается металлокарбидных покрытий, то максимальное значение прочности сцепления с основой составляет 32 МПа при содержании карбидной фазы 18,4 %. При этом прочность сцепления покрытия нанесенного по традиционной технологии из проволоки Св-08Г2С-О составляет 26 МПа. Повышение указанной характеристики для композиционных покрытий объясняется дополнительной активацией напыляемой поверхности нерасплавленными твердыми частицами Al_2O_3 и ТiС. Показано, что уменьшение прочности сцепления при повышении содержания Al_2O_3 до 10,3 % и ТiС до 25,2 % объясняется значительным снижением фактической площади контакта покрытия с основой.

Ключевые слова: электродуговое напыление; композиционные покрытия; оксид алюминия; карбид титана; прочность сцепления; микротвердость

Надійшла (received) 18.02.2021

УДК 621.314

doi:10.20998/2413-4295.2021.01.03

ВПЛИВ ВЕЛИЧИНИ ВХІДНОЇ ІНДУКТИВНОСТІ НА ЯКІСНІ ПОКАЗНИКИ РОБОТИ АКТИВНОГО КЕРОВАНОГО ВИПРЯМЛЯЧА

Д. С. КРИЛОВ*, О. І. ХОЛОД

кафедра промислової і біомедичної електроніки, НТУ «ХПІ», Харків, УКРАЇНА

*e-mail: denis.krylov@khpі.edu.ua

АНОТАЦІЯ Основна частина електроенергії використовується промисловими установками в перетвореному вигляді, тому застосування напівпровідникових перетворювачів стрімко зростає. Світова тенденція енергозбереження підвищує вимоги до якості роботи напівпровідникових перетворювачів, їхнього впливу на мережу живлення, навантаження і суміжних споживачів. Одним із найбільш популярних перетворювачів у сегменті приводів малої і середньої потужності є частотний перетворювач, виконаний на основі схеми трифазного автономного інвертора напруги. Істотним недоліком таких перетворювачів є використання діодного випрямляча на вході схеми, що має два такі недоліки - неможливість рекуперації електроенергії в мережу живлення у режимі динамічного гальмування асинхронного двигуна та суттєве спотворення форми струму мережі. Усунути ці недоліки можна, використовуючи замість діодного випрямляча активний випрямляч, що забезпечує синусоїдальну форму струму мережі в фазі з напругою мережі живлення і можливість двонаправленого обміну енергією з навантаженням. Ефективність роботи активного випрямляча-джерела напруги визначається обраним алгоритмом керування ключами схеми і коректним завданням величини індуктивності вхідного дроселя. Створено математичну модель трифазного активного випрямляча-джерела напруги, що працює з фіксованою частотою модуляції при векторному алгоритмі побудови системи керування і аналіз впливу величини вхідної індуктивності на якісні показники його роботи. З результатів моделювання стало очевидно, що запропонована структура системи керування забезпечує стійку роботу перетворювача і допустиму стандартами електромагнітну сумісність з мережею живлення при фіксованій частоті модуляції; запропонований алгоритм розрахунку величини вхідних індуктивностей дозволяє коректно вибрати їх допустиме значення, а отримані при моделюванні залежності дозволяють найбільш точно визначити значення вхідних індуктивностей по допустимому рівню спотворень струму мережі і напруги живлення.

Ключові слова: активний випрямляч; широтно-імпульсна модуляція; векторна система керування; вхідна індуктивність; MatLab-модель; коефіцієнт гармонійних спотворень; електромагнітна сумісність

THE INFLUENCE OF THE INPUT INDUCTANCE ON THE QUALITATIVE INDICATORS OF ACTIVE CONTROLLED RECTIFIER

D. KRYLOV, O. KHOLOD

Department of industrial and biomedical electronics, NTU "KPI", Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT The main part of electricity is used by industrial plants in a converted form and the use of semiconductor converters is growing rapidly. The requirements for the quality of semiconductor converters are increased. And their impact on the power supply, load and related consumers is increased too. One of the most popular converters in the segment of low and medium power drives is a frequency converter made on the basis of a three-phase stand-alone voltage inverter. A significant disadvantage of such converters is the use of a diode rectifier at the input of the circuit, which has disadvantages as the inability to recover electricity to the mains in the mode of dynamic braking of an induction motor and significant distortions of the mains current. These disadvantages can be eliminated by using an active rectifier instead of a diode rectifier, which provides a sinusoidal shape of the mains current in phase with the mains voltage and the possibility of bidirectional energy exchange with the load. The efficiency of the active rectifier-voltage source is determined by the selected control algorithm of the circuit switches and the correct task of the inductance of the input choke. A mathematical model of a three-phase active rectifier-voltage source, working with a fixed modulation frequency with a vector algorithm for building a control system and analysis of the influence of the input inductance on the quality of its work was created. From the simulation results it became obvious that the proposed structure of the control system provides stable operation of the converter and acceptable standards for electromagnetic compatibility with the mains at a fixed modulation frequency; the proposed algorithm for calculating the value of the input inductances allows you to correctly select their allowable value, and obtained in the simulation of the dependence allows you to most accurately determine the value of the input inductances on the allowable level of distortion of mains current and supply voltage.

Keywords: active rectifier; pulse width modulation; vector control system; input inductance; MatLab model; coefficient of harmonic distortions; electromagnetic compatibility

Вступ

Все більша частина електроенергії використовується промисловими установками в перетвореному вигляді й застосування

напівпровідникових перетворювачів для отримання заданих параметрів навантаження стрімко зростає. Через актуальність енергозбереження підвищуються вимоги до якості роботи напівпровідникових перетворювачів, їхнього впливу на мережу живлення,

навантаження та суміжних споживачів [1]. Одним із найбільш популярних перетворювачів у сегменті приводів малої та середньої потужності є частотний перетворювач, виконаний на основі схеми трифазного автономного інвертора напруги (АІН) [2,3]. Він призначений, перш за все, для живлення асинхронних електродвигунів (АД) від промислової мережі 380 V, і забезпечує необхідні динамічні й економічні показники. Істотним недоліком таких перетворювачів є використання діодного випрямляча на вході схеми. Він забезпечує створення проміжного ланцюга постійної напруги на вході АІН. Діодні випрямлячі прості та надійні, проте володіють двома суттєвими недоліками - неможливістю рекуперації електроенергії у мережу живлення в режимі динамічного гальмування АД та істотними спотвореннями форми струму мережі [4,5]. Усунути ці недоліки можна, використовуючи замість діодного випрямляча активний випрямляч, виконаний за схемою джерела напруги (АВДН) [6]. Він представляє собою мостову схему на транзисторних ключах знакозмінного струму, що, за рахунок взаємодії вхідної, вихідної напруги і напруги самоіндукції дроселя мережі за алгоритмом (що задається обраною топологією системи керування), забезпечує синусоїдальну форму струму мережі в фазі з напругою мережі живлення і можливість двонаправленого обміну енергією з навантаженням [7].

Мета роботи

Ефективність роботи АВДН визначається обраним алгоритмом керування ключами схеми і коректним завданням величини індуктивності вхідного дроселя. Систему керування такою схемою можна побудувати із використанням параметричного або векторного алгоритмів розрахунку при фіксованій або змінній частоті модуляції [8,9].

Метою роботи є створення математичної моделі трифазного активного випрямляча – джерела напруги, що працює з фіксованою частотою модуляції при векторному алгоритмі побудови системи керування і аналіз впливу величини вхідної індуктивності на якісні показники його роботи.

Виклад основного матеріалу

На рис. 1 наведена структура перетворювача із використанням трифазного активного випрямляча – джерела напруги.

Структура містить: джерело трифазної змінної

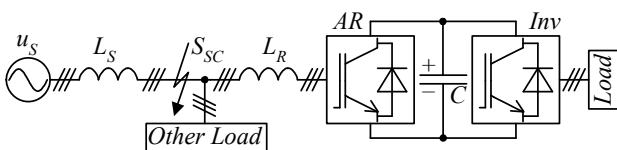


Рис. 1 – Структурна схема перетворювача з АВДН

напруги u_s ; еквівалентну індуктивність мережі живлення L_s , що характеризує потужність короткого замикання джерела в точці підключення перетворювача та інших навантажень SSC ; вхідні реактори АВДН L_R ; активний випрямляч AR , виконаний за трифазною мостовою схемою на ключах знакозмінного струму; конденсатор C в проміжному ланцюзі постійного струму; трифазний мостовий автономний інвертор напруги (АІН) Inv , також виконаний за трифазною мостовою схемою на ключах знакозмінного струму і навантажений на трифазне навантаження $Load$, що є еквівалентом асинхронної машини.

Розглянемо докладніше структуру системи керування досліджуваного АВДН, запропоновану авторами [10], що наведена на рис. 2. Вона заснована на представленні струмів і напруг мережі живлення у вигляді узагальнених векторів у просторовій системі координат pqr і складається з блоків 1–17, взаємодіючих між собою за наступним алгоритмом:

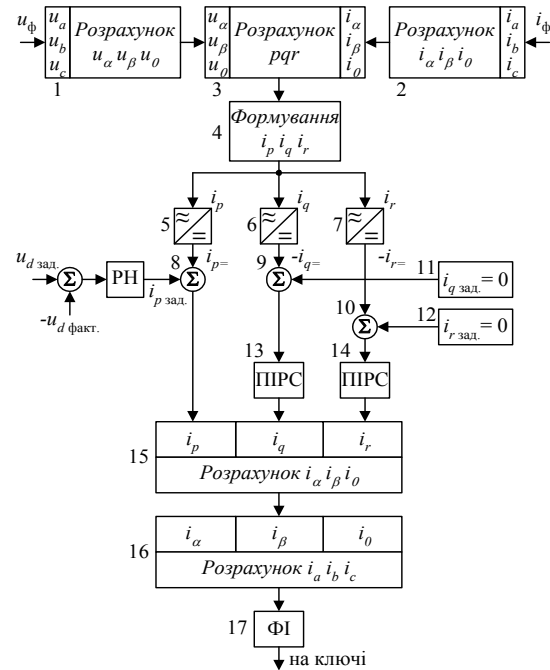


Рис. 2 – Система керування АВДН

Фазні напруги u_ϕ (u_a , u_b , u_c) подаються на блок 1, у якому за допомогою матриці (6) [10] перераховується I_3 нерухомої просторової трифазної системи abc у нерухому просторову систему $\alpha\beta 0$. Те саме відбувається у блоці 2 із фазним струмом. У блоці 3 напруги й струми із нерухомої просторової системи $\alpha\beta 0$ перетворюються в обертову просторову систему pqr за допомогою матриці перетворення (10) [10]. Для використання матриці (10) [10] необхідно розрахувати модуль вектора напруги в системі $\alpha\beta 0$ ($U_{\alpha\beta 0}$) за виразом (8) й модуль проєкції вектора напруги на площину $\alpha\beta$ ($U_{\alpha\beta}$) за виразом (9) [10]. Сигнал завдання струму фази формується в блоці 4 й розподіляється на i_p , i_q , i_r . Блоки 5, 6 й 7 відсіюють

змінну складову цих струмів, залишаючи лише постійну. Далі, за допомогою суматорів 8, 9 та 10 постійні складові цих струмів порівнюються з заданим значенням струмів фази, формуючи сигнали відхилення між фактичними і заданими струмами фази ($i_{pзад}$, $i_{qзад}$, $i_{rзад}$). Задані сигнали містяться у блоках 11, 12 й дорівнюють нулю. Блоки 13 й 14 містять пропорційно-інтегральні регулятори струму (ПІРС). У блоці 15 струми за допомогою матриці (13) [10] перетворюються із просторової обертової системи pqr у нерухому просторову систему $\alpha\beta 0$. Для використання матриці (13) [10] необхідно розрахувати значення кутів θ_1 і θ_2 за виразами (11) та (12) [10] відповідно. У блоці 16 за допомогою матриці (14) [10] сигнал перетворюється з системи $\alpha\beta 0$ у нерухому просторову трифазну систему abc й подаються на блок 17 формування імпульсів ФІ, що побудований за принципом *PWM* генератора з фіксованою частотою модуляції, а далі надходить на ключі АВН [10].

При роботі трифазної схеми АВДН з фіксованою частотою модуляції основна гармоніка фазного струму на його вході визначається амплітудою і фазою основної гармоніки напруги, що формується у фазах вхідного ланцюга схеми. При цьому швидкість зміни миттєвого струму мережі визначається її індуктивністю і суперпозицією миттєвої фазної напруги джерела живлення на інтервалі модуляції з напругою ланки постійного струму на виході схеми. У цьому випадку відхилення миттєвого струму фази від синусоїдального сигналу завдання буде різним за період роботи схеми. Тому для заданих значень напруги джерела живлення і середньої вихідної напруги АВДН коректний вибір величини вхідного реактора схеми буде у значній мірі визначати якісні показники її роботи.

Стійка робота перетворювача може бути забезпечена у широкому діапазоні величин вхідної індуктивності. Найбільше її значення може бути визначено максимальним діючим значенням вхідного струму фази схеми як

$$L_{\max} = \frac{U_{L(1)}}{2\pi f_0 I_{\max}}, \quad (1)$$

де f_0 – частота напруги живлячої мережі; $U_{L(1)}$ – діюче значення першої гармоніки напруги на вхідній індуктивності. Воно, із умови роботи вхідного ланцюга схеми [12], може бути визначено за виразом

$$U_{L(1)} = \sqrt{U_{V(1)}^2 - U_f^2}, \quad (2)$$

де U_f – діюче значення фазної напруги джерела живлення; $U_{V(1)}$ – діюче значення першої гармоніки фазної напруги на вході схеми.

Відомо [10], що напруга на вході трифазного АВДН формується з ділянок напруги ланки постійного струму, яке, в разі використання синусоїдальної широтно-імпульсної модуляції, має бути мінімум на 15% більше амплітуди лінійної

напруги джерела живлення. Виходячи з цього, можна прийняти, що $U_{V(1)} = 1,15U_f$ і, підставивши (2) в (1)

для мережі живлення з $f_0 = 50$ Hz отримати

$$L_{\max} = \frac{U_f \sqrt{1,15^2 - 1^2}}{2\pi f_0 I_{\max}} = \frac{U_f}{I_{\max}} 1,8 \cdot 10^{-3}. \quad (3)$$

Мінімальне значення вхідної індуктивності схеми L_{\min} можна визначити з умови обмеження струму короткого замикання. При цьому зазвичай приймається умова, що падіння напруги на індуктивності фази не повинно перевищувати 5% від фазної напруги джерела живлення, тобто $U_{L(1)} = 0,05U_f$. Тоді з (1) отримаємо

$$L_{\min} = \frac{0,05U_f}{2\pi f_0 I_{\max}} = \frac{U_f}{I_{\max}} 1,6 \cdot 10^{-4}. \quad (4)$$

З вищесказаного очевидно, що можливе значення вхідної індуктивності АВДН лежить в широких межах між L_{\min} і L_{\max} , а її кінцевий вибір буде залежати, перш за все, від прийнятої частоти модуляції і допустимих значень *THD* струму і напруги мережі в точці підключення перетворювача.

Обговорення результатів

На рис. 3 зображена *MatLab*-модель схеми частотного перетворювача з АВДН. Вона повністю відповідає структурі, що представлена на рис. 1 і має наступні параметри:

- трифазне джерело напруги живлення з потужністю короткого замикання 150 MVA і діючим значенням лінійної напруги 6 kV;

- трансформатор потужністю 1 MVA, який здійснює перетворення лінійної напруги мережі живлення 6 kV в лінійну напругу 0,4 kV для живлення досліджуваної схеми і інших навантажень, що працюють паралельно з нею;

- в якості додаткового навантаження використаний тиристорний керований випрямляч потужністю 300 kW, виконаний за шестипульсною мостовою схемою;

- силові схеми АВДН і АІН працюють в режимі синусоїдальної ШІМ з фіксованою на рівні 4 kHz частотою модуляції. Ємність ланки постійного струму обрано рівної 28 μF . Система керування АВДН побудована за структурою, наведеною на рис. 2. Система керування АІН побудована по замкнутому принципу і підтримує в навантаженні виділення активної потужності на рівні 315 kW для будь-якого режиму роботи схеми. Еквівалентне *RL*-навантаження моделює статорний ланцюг асинхронного електродвигуна номінальною потужністю 315 kW.

Виходячи з наведених параметрів схеми, за виразами (3) і (4) можна визначити мінімальну і максимальну величину індуктивності, необхідну у вхідному колі АВДН. Вона може бути обрана в

діапазоні 81–914 μH . Сумарна індуктивність перетворювального трансформатора і мережі живлення, наведена до точки підключення АВДН, становить 18 μH , що істотно нижче необхідної. Таким чином, індуктивність додаткових вхідних реакторів, що включаються послідовно в фази на вході перетворювача, може бути обрана в діапазоні 100–90 μH .

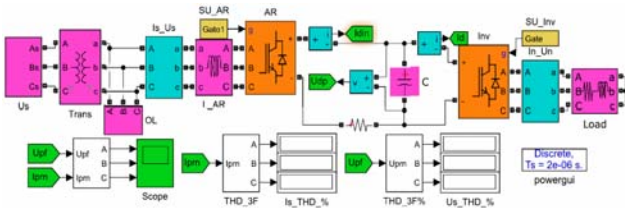


Рис. 3. – MatLab-модель схеми перетворювача з АВДН

За допомогою розробленої моделі були проведені експериментальні дослідження впливу величини додаткової індуктивності, що включається у вхідний ланцюг АВДН, на сумарний коефіцієнт гармонійних спотворень THD фазних струмів і напруг мережі живлення в точці підключення перетворювача. Експерименти проводилися для випадків відсутності і наявності додаткового навантаження, що включається паралельно на затискачі джерела живлення. Отримані результати наведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Експериментальні данні дослідження

| $THD, \%$ | Індуктивність вхідного реактора, μH | | | | | | | | |
|-----------------------------------|--|-------|-------|------|------|------|------|------|------|
| | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 | 900 |
| Відключене додаткове навантаження | | | | | | | | | |
| THD_I | 7,4 | 4,13 | 2,89 | 2,24 | 1,85 | 1,61 | 1,48 | 1,48 | 1,48 |
| THD_U | 18,05 | 10,26 | 7,14 | 5,45 | 4,39 | 3,65 | 3,11 | 2,68 | 2,35 |
| Підключене додаткове навантаження | | | | | | | | | |
| THD_I | 7,53 | 4,31 | 3,16 | 2,60 | 2,27 | 2,02 | 1,95 | 2,08 | 2,24 |
| THD_U | 19,51 | 12,83 | 10,65 | 9,66 | 9,13 | 8,82 | 8,63 | 8,49 | 8,38 |

На рис. 4 наведено графічні залежності THD фазних струмів і напруг мережі живлення в точці підключення перетворювача від величини додаткової вхідної індуктивності, отримані з експериментальних даних табл. 1.

З рис. 4 видно, що сильна залежність спотворень струму мережі від вхідних індуктивностей спостерігається лише в першій третині її зміни. У цьому ж діапазоні досягаються допустимі стандартом значення THD струму мережі як в режимі спотворень від додаткового навантаження, так і без них.

Спотворення, що вносяться додатковим навантаженням у напругу мережі, несуттєво впливають на сумарний коефіцієнт гармонійних спотворень струму мережі для обраної структури системи керування АВДН при фіксованій частоті модуляції.

Залежність THD напруги від величини вхідної індуктивності схеми без додаткового навантаження присутня у всьому діапазоні її зміни і особливо

сильна в першій його третині. Допустимі стандартом значення спотворень напруги досягаються при значеннях вхідних індуктивностей, що лежать в середині діапазону їх можливої зміни.

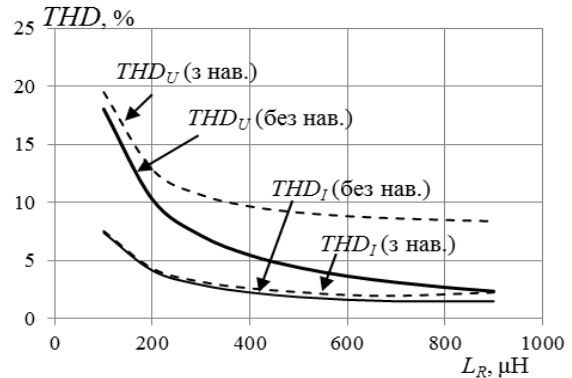


Рис. 4 – Графічні залежності THD від величини додаткової вхідної індуктивності

При наявності спотворень, що вносяться в напругу джерела живлення, його THD ніколи не досягне допустимих стандартом значень і схемі буде потрібний додатковий фільтр мережі.

На рис. 5 і рис. 6 наведені машинограми фазних напруг і струмів, які ілюструють роботу АВДН без і з додатковим навантаженням, підключеним паралельно затискачам мережі перетворювача. Машинограми на рис. 5–6 зняті для випадку роботи схеми з фазною індуктивністю в 500 μH .

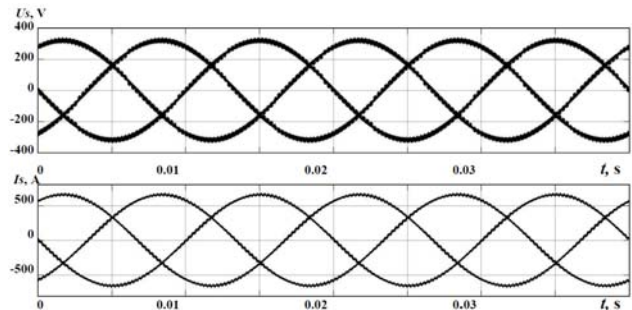


Рис. 5 – Машинограми роботи перетворювача без додаткового навантаження

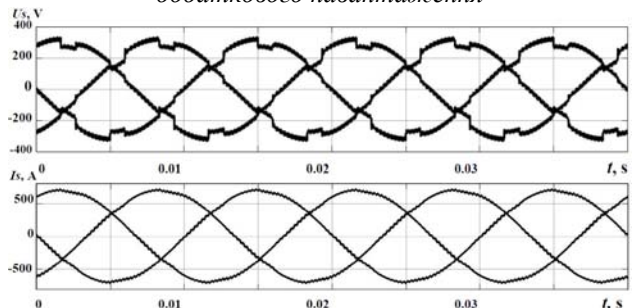


Рис. 6 – Машинограми роботи перетворювача з додатковим навантаженням

Як видно з рис. 4–6, додаткове навантаження у вигляді трифазного тиристорного керованого випрямляча, підключеного до затискачів джерела

живлення паралельно АВДН, вносить істотні нелінійні спотворення в напругу мережі.

Висновки

З результатів моделювання трифазного АВДН в структурі частотного електроприводу на основі АПН можна зробити наступні висновки:

- запропонована структура системи керування забезпечує стійку роботу перетворювача і допустиму стандартами електромагнітну сумісність з мережею живлення при фіксованій частоті модуляції;
- запропонований алгоритм розрахунку величини вхідних індуктивностей дозволяє коректно вибрати їх допустиме значення;
- отримані при моделюванні залежності дозволяють найбільш точно визначити значення вхідних індуктивностей по допустимому рівню спотворень струму мережі і напруги живлення;
- для ліквідації спотворень, що вносяться в напругу джерела додатковим нелінійним навантаженням може знадобитися фільтр мережі.

Список літератури

1. Kumaresan S., Habeebullah Sait H. Embedded System Implementation of Shunt Active Power Filter with Direct Compensation Component Generation Using Linear Operational Amplifiers. *Journal of Circuits, Systems and Computers*, 2020. Vol. 29. № 10. P. 34–40. doi:10.1142/S0218126620501662.
2. Vaideeswaran V., Sankar N. Control Techniques of Three Phase PWM Rectifier. *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)*, 2018. Vol. 8, № 2S, P. 148–152. doi: 10.17577/IJERTV7IS010161.
3. Жемеров Г. Г., Крилов Д. С., Тугай Д. В. Компенсовані керування випрямлячі в розподілених системах електропостачання. Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2020, 258 с.
4. Тугай Д. В., Жемеров Г. Г., Котелевець С. В., Шкурпела О. О. Новий спосіб керування паралельним силовим активним фільтром на основі модифікованої р-q-г теорії потужності. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: «Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії»*. Харків: НТУ «ХПІ». 2019. № 20 (1345). С. 152–160. doi:10.20998/2409-9295.2019.20.22.
5. Jamma M., Akherraz' M., Barara M. ANFIS Based DC-Link Voltage Control of PWM Rectifier-Inverter System with Enhanced Dynamic Performance. *44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. IECON*, 2018. doi: 10.1109/IECON.2018.8591620.
6. Premkumar K., Prema Kandasamy M., Vishnu Priya M., Thamizhselvan T., Ron Carter S. B. Three-Phase Rectifier Control Techniques: A Comprehensive Literature Survey. *International journal of scientific & technology research*. 2020. Vol. 9. № 01. P. 3183–3188. doi: 10.35940/ijitee.B7508.129219.
7. Trinh Q. N., Choo F. H., Tang Y., Wang P. A Control Strategy to Compensate for Current and Voltage Measurement Errors in Three-phase PWM Rectifiers. *IEEE Transactions on Industry Applications*. Vol. 55, Iss. 3. 2019. doi: 10.1109/TIA.2019.2894107.

8. Zhou D., Li X., Tang Y. Multiple-Vector Model-Predictive Power Control of Three-Phase Four-Switch Rectifiers With Capacitor Voltage Balancing. *IEEE Transactions on Power Electronics*. Vol. 33. Iss. 7. 2018. doi: 10.1109/TPEL.2017.2750766.
9. Tlili F., Bacha F., Guesmi M. New Switching Lookup Table for Direct Power Control of a Three-Phase PWM Rectifier. *The 9th International Renewable Energy Congress (IREC)*. 2018. doi: 10.1109/IREC.2018.8362513.
10. Krylov D., Kholod O., Radohuz S. Active rectifier with different control system types. *2020 IEEE 4th International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*. Istanbul. Turkey. 2020. P. 273–278. doi: 10.1109/IEPS51250.2020.9263226.
11. Жемеров Г. Г., Тугай Д. В. *Перетворення координат загальних векторів напруг і струмів трифазної системи електропостачання*. Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2019. – 200 с.
12. Тугай Д. В. Методика вибору індуктивності фазних реакторів силового активного фільтра. *Електротехніка і електромеханіка*. Харків: НТУ «ХПІ». 2016. № 6. С. 31–38. doi: 10.20998/2074-272X.2016.6.06.

References (transliterated)

1. Kumaresan S., Habeebullah Sait H. Embedded System Implementation of Shunt Active Power Filter with Direct Compensation Component Generation Using Linear Operational Amplifiers. *Journal of Circuits, Systems and Computers*, 2020. Vol. 29, no. 10, pp. 34–40. doi: 10.1142/S0218126620501662.
2. Vaideeswaran V., Sankar N. Control Techniques of Three Phase PWM Rectifier. *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)*, 2018, Vol. 8, no. 2S, pp. 148–152, doi: 10.17577/IJERTV7IS010161.
3. Zhemerov G. G., Krylov D. S., Tugay D. V. *Kompensovani kerovani vypryamlyachi v rozpodilynykh systemakh elektropostachannia [Compensated controlled rectifiers in distributed power supply systems]*. Kharkiv: KhNUUE O. M. Beketova, 2020, 258 p.
4. Tugay D. V., Zhemerov G. G., Kotelevets S. V., Shkurpela O. O. Novyi sposib keruvannia paralelnym sylovym aktyvnym filtrom na osnovi modyfikovanoi p-q-r teorii potuzhnosti [A new way to control a parallel power active filter based on a modified p-q-r theory of power]. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: "Electric machines and electromechanical energy conversion"*. Kharkiv: NTU "KhPI", 2019, no. 20 (1345), pp. 152–160, doi: 10.20998/2409-9295.2019.20.22.
5. Jamma M., Akherraz' M., Barara M. ANFIS Based DC-Link Voltage Control of PWM Rectifier-Inverter System with Enhanced Dynamic Performance. *44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, IECON*, 2018, doi: 10.1109/IECON.2018.8591620.
6. Premkumar K., Prema Kandasamy M., Vishnu Priya M., Thamizhselvan T., Ron Carter S. B. Three-Phase Rectifier Control Techniques: A Comprehensive Literature Survey. *International journal of scientific & technology research*. 2020, Vol. 9, no. 01, pp. 3183–3188, doi: 10.35940/ijitee.B7508.129219.
7. Trinh Q. N., Choo F. H., Tang Y., Wang P. A Control Strategy to Compensate for Current and Voltage Measurement Errors in Three-phase PWM Rectifiers. *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 55, Iss. 3, 2019, doi: 10.1109/TIA.2019.2894107.
8. Zhou D., Li X., Tang Y. Multiple-Vector Model-Predictive Power Control of Three-Phase Four-Switch Rectifiers With

- Capacitor Voltage Balancing. *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 33, Iss. 7, 2018, doi: 10.1109/TPEL.2017.2750766.
9. Tlili F., Bacha F., Guesmi M. New Switching Lookup Table for Direct Power Control of a Three-Phase PWM Rectifier. *The 9th International Renewable Energy Congress (IREC)*, 2018, doi: 10.1109/IREC.2018.8362513.
10. Krylov D., Kholod O., Radohuz S. Active rectifier with different control system types. *2020 IEEE 4th International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*, Istanbul, Turkey, 2020, pp. 273–278, doi: 10.1109/IEPS51250.2020.9263226.
11. Zhemerov G. G., Tugay D. V. *Peretvorennia koordynat zahalnykh vektoriv napruh i strumiv tryfaznoi systemy elektropostachannia [Reconstruction of coordinates of backward vectors along the lines and structures of the three-phase system and electrical power supply]*. Kharkiv: KhNUUE. O. M. Beketova, 2019, 200 p.
12. Tugay D. V. Metodika vybora induktivnosti faznykh reaktorov silovogo aktivnogo fil'tra [Method of choosing the inductance of phase reactors of a power active filter]. *Electrical engineering and electrical engineering*. Kharkiv: NTU "KhPI", 2016, no. 6, pp. 31–38, doi: 10.20998/2074-272X.2016.6.06.

Сведения об авторах (About authors)

Крилов Денис Сергійович – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри промислової та біомедичної електроніки; м Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-1025-3939; e-mail: denis.krylov@khpі.edu.ua.

Denis Krylov – Candidate of Technical Sciences, associate professor, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", associate professor at the Department of industrial and biomedical electronics, Kharkiv, Ukraine ORCID: 0000-0002-1025-3939; e-mail: denis.krylov@khpі.edu.ua.

Холод Ольга Георгівна – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший викладач кафедри промислової та біомедичної електроніки; м Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-0036-0239; e-mail: Olha.Kholod@khpі.edu.ua.

Olga Kholod – Candidate of Technical Sciences, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", senior lecturer at the Department of industrial and biomedical electronics, Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-0036-0239; Olha.Kholod@khpі.edu.ua

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Крилов Д. С. Холод О. І. Вплив величини вхідної індуктивності на якісні показники роботи активного керованого випрямляча. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2021. № 1 (7). С. 18-23. – doi:10.20998/2413-4295.2021.01.03.

Please cite this article as:

Krylov D., Kholod O. The influence of the input inductance on the qualitative indicators of active controlled rectifier. *Bulletin of the National Technical University "KhPI"*. Series: New solutions in modern technology. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2021, 1 (7), 18-23, doi:10.20998/2413-4295.2021.01.03.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Крылов Д. С., Холод О. И. Влияние величины входной индуктивности на качественные показатели работы активного управляемого выпрямителя. *Вестник Национального технического университета «ХПИ»*. Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». 2021. № 1 (7). – С. 18-23. – doi:10.20998/2413-4295.2021.01.03.

АННОТАЦІЯ Основная часть электроэнергии используется промышленными установками в преобразованном виде. Применение полупроводниковых преобразователей стремительно растет. Мировая тенденция энергосбережения повышает требования к качеству работы полупроводниковых преобразователей, их влиянию на питающую сеть, нагрузки и смежных потребителей. Одним из наиболее популярных преобразователей в сегменте приводов малой и средней мощности является частотный преобразователь, выполненный на основе схемы трехфазного автономного инвертора напряжения. Существенным недостатком таких преобразователей является использование диодного выпрямителя на входе схемы, который обладает недостатками: невозможностью рекуперации электроэнергии в питающую сеть в режиме динамического торможения асинхронного двигателя и существенными искажениями формы тока сети. Устранить эти недостатки можно, используя вместо выпрямителя на диодах активный управляемый выпрямитель, который обеспечивает синусоидальную форму тока сети в фазе с напряжением сети и возможность двунаправленного обмена энергией с нагрузкой. Эффективность работы активного выпрямителя-источника напряжения определяется выбранным алгоритмом управления ключами схемы и корректным заданием величины индуктивности входного дросселя. Создана математическая модель трехфазного активного выпрямителя-источника напряжения, который работает с фиксированной частотой модуляции при векторном алгоритме построения системы управления и анализ влияния величины входной индуктивности на качественные показатели его работы. Результаты моделирования показали, что предложенная структура системы управления обеспечивает устойчивую работу преобразователя и допустимую стандартами электромагнитную совместимость с питающей сетью при фиксированной частоте модуляции. Предложен алгоритм расчета величины входных индуктивностей, который позволяет корректно выбрать их допустимое значение, а полученные при моделировании зависимости позволяют наиболее точно определить значения входных индуктивностей по допустимому уровню искажений тока сети и напряжения питания.

Ключевые слова: активный выпрямитель; широтно-импульсная модуляция; векторная система управления; входная индуктивность; MatLab-модель; коэффициент гармонических искажений; электромагнитная совместимость

Надійшла (received) 21.02.2021

УДК 621.757:621.7.08

doi:10.20998/2413-4295.2021.01.04

**ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНОГО ПРИПУСКУ НА ОБРОБЛЕННЯ ПОВЕРХОНЬ
ЗАГОТОВКИ ЗА КРИТЕРІЄМ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ПОШКОДЖУВАНOSTI****Я. М. КУСИЙ^{1*}, В. Г. ТОПІЛЬНИЦЬКИЙ²**¹кафедра робототехніки та інтегрованих технологій машинобудування, Національний університет «Львівська політехніка», Львів, УКРАЇНА²кафедра проектування та експлуатації машин, Національний університет «Львівська політехніка», Львів, УКРАЇНА

*e-mail: yaroslav.m.kusyi@lpnu.ua

АНОТАЦІЯ При забезпеченні машинобудівними виробами службового призначення реалізується множина причинно-спадкових взаємозв'язків як функцій відклику фізичних процесів і впливів навколишнього середовища, що призводять до еволюції якісних показників виробу: його життєвого циклу та формування умов для фізичного та морального зношування деталей і машин. Раціональне керування технологічним успадкуванням властивостей матеріалу деталей машин для забезпечення їх експлуатаційних характеристик і показників надійності у рамках синергетичного підходу служить методологічною основою проектування прогресивних технологічних процесів виготовлення виробів. Технологічне забезпечення регламентованих показників якості виробів реалізується обмеженою кількістю раціональних варіантів взаємодії виробу із технологічним середовищем при необхідній кількості стійких зв'язків. Вибір раціональних критеріїв оптимізації при вирішенні технологічних задач, зокрема, розрахунку припусків на механічне оброблення заготовок, на етапах конструкторської та технологічної підготовки виробництва дозволяє забезпечити необхідні вихідні параметри виробів і їх експлуатаційні характеристики при виготовленні та складанні і прогнозувати поведінку деталей і машин на стадії експлуатації їх життєвих циклів. Розроблено методику вибору раціонального припуску на оброблення поверхонь литої заготовки із врахуванням технологічного успадкування властивостей матеріалу. Проаналізовано традиційні методи визначення припуску на механічне оброблення виробів. Запропоновано технологічну пошкоджуваність як критерій оптимізації при вирішенні технологічних задач. Представлено метод LM–твердості, що застосовується для вибору припуску на оброблення функціональних поверхонь виробу. Описано технологічне забезпечення реалізації експериментальних досліджень. Раціональні значення припусків для оброблення плоскої заготовки із алюмінієвого сплаву на підставі результатів експериментальних досліджень складають 4–7 мм залежно від розташування концентраторів напружень. Намічено шляхи подальших досліджень.

Ключові слова: життєвий цикл виробу; технологічний процес; технологічне середовище; припуск; технологічне успадкування; гомогенність; технологічна пошкоджуваність; заготовка

**DETERMINATION OF THE RATIONAL ALLOWANCE FOR BLANK SURFACE
TREATMENT BY THE CRITERION OF TECHNOLOGICAL DAMAGE****Y. KUSYI¹, V. TOPILNYTSKYI²**¹Department of Robotics and Integrated Mechanical Engineering Technologies, Lviv Polytechnic National University, Lviv, UKRAINE²Department of Designing and Operation of Machines, Lviv Polytechnic National University, Lviv, UKRAINE

ABSTRACT The multiplicity of causal relationships as a functions of the response of the physical processes and the environmental influences are realized by means of providing of service functions of mechanical engineering products. This provides the evolution of quality indicators of the product in its Life Cycle and the formation of the conditions for physical and moral wear of products and machines. Rational management of technological inheritability of material properties of machine products to provide their operational characteristics and reliability indicators by means of the synergetic approach is a methodological basis for the design of advanced technological processes of products manufacturing. Technological providing of standart quality indicators of products is realized by a limited number of rational variants of relations between the product and the technological environment using necessary number of stable connections. The choice of rational optimization criteria to solve the technological problems, in particular, the calculation of allowances for workpieces machining, at the substages of design and technological preparation provide the necessary initial parameters of products and their operational characteristics during manufacturing and assembly. It also allows to predict the behavior of products and machines at the operation stage of their Life Cycles. A method of choosing a rational allowance for surfaces treatment of castings, taking into account the technological inheritability of material properties was studied. Traditional methods of the allowance determining during products machining are analyzed. Technological damageability as a criterion for optimization in solving technological problems is proposed. The LM–hardness method used to select the allowance for the treatment of functional surfaces of the product is presented. Technological providing of the experimental researches is described. Rational values of the allowances for processing of aluminium alloy flat workpiece are 4–7 mm as a result of experimental researches depending on an arrangement of stress concentrators. The directions of further researches are determined.

Keywords: Product Life Cycle; technological process; technological environment; allowance; technological inheritability; homogeneity; technological damageability; blank

Вступ

Розвиток машинобудівної галузі на сучасному етапі пов'язаний із розробленням нових і

удосконаленням існуючих технологій [1,2].
Проектовані технології повинні базуватися на ефективних і енергоощадних методах механічного

оброблення, термічної обробки та нанесення покриттів, процесах поверхневого–пластичного деформування, комбінованих і суміщених методах оброблення заготовок. Прогнозування поведінки виробу на стадії його експлуатації розширює технологічні можливості використовуваних технологій та дозволяє ефективно впроваджувати сучасні технологічні процеси (ТП) у виробничу практику [2–5].

При забезпеченні машиною та її складовими елементами (складальними одиницями, деталями) свого службового призначення формується множина причинно–спадкових взаємозв'язків як функцій відклику фізичних процесів і впливів навколишнього середовища, що призводять до еволюції якісних показників виробу протягом етапів і стадій його життєвого циклу та формування умов для його фізичного та морального зношування [2,3].

Поряд із тим раціональне керування технологічним успадкуванням властивостей матеріалу деталей машин для забезпечення їх експлуатаційних характеристик і показників надійності в умовах самоорганізації структур служить методологічною основою проектування прогресивних технологічних процесів виготовлення виробів і складання машин [2,3,6].

На підставі синергетичного підходу за рахунок самоорганізації технологічних систем при виготовленні деталей і складання машин відбувається диференціація корисних (позитивних) і шкідливих (негативних) властивостей виробів згідно їх службового призначення, формуються технологічні бар'єри у ланцюгу відправка заготовка – готова деталь при технологічному успадкуванні негативних властивостей матеріалу і за допомогою сформованих бар'єрів – забезпечується технологічне успадкування нових корисних властивостей [6–8].

Однак відсутність раціонального критерію комплексної оцінки деградації матеріалу виробу при проектуванні ТП в умовах технологічного успадкування гальмує впровадження раціональних технологій у машинобудівну практику.

Огляд літературних джерел

Службове призначення виробу забезпечується при раціональному балансі усіх етапів стадії створення життєвого циклу виробу на підставі основних груп факторів [1,2]. Однак, згідно принципу Бора [8] при самоорганізації технологічних систем формуються процеси деградації властивостей матеріалу та зниження важливих характеристик технічних об'єктів, що описують з єдиних синергетичних позицій [3] із встановленням обмеженої кількості лімітуючих експлуатаційних характеристик та показників надійності виробів.

Ресурс виробу поряд із дотриманням технічних вимог щодо якості, визначається динамікою зміни вихідних параметрів з позиції технологічного успадкування властивостей, яку визначають

діагностуванням [3], зокрема на етапі випробувань життєвого циклу виробу.

Початкова інформація про технологічне успадкування властивостей деталей встановлюється на підставі функціонального призначення спряжень і забезпечується структурою технологічних процесів їх механічного оброблення та складання машин [1,2].

З позиції технологічного успадкування властивостей номенклатура вихідних параметрів (числових показників технічних характеристик машини, що визначають її технічний стан і функціональні можливості) та їхні граничні значення забезпечують експлуатаційні параметри та показники надійності машини відповідно до її службового призначення. Деградація технічних характеристик деталей і машин є основним об'єктом аналізу та оцінки при забезпеченні експлуатаційної надійності виробів [2; 4; 5].

Загальні закони організації та розвитку систем підлягають системному функціонально–морфологічно–інформаційному аналізу, на підставі дослідження взаємозв'язків і взаємовпливів функціонального, морфологічного та інформаційного опису [6; 7; 9].

Функціональний опис системи задається вісьмома важливими параметрами [10]:

$$S_F = \{T, x, C, W, y, Y, \varphi, \eta\}, \quad (1)$$

де T – множина періодів часу; x – множина миттєвих значень вхідних (початкових) впливів; $C = \{c: T \rightarrow x\}$ – множина допустимих вхідних впливів; W – множина станів; y – множина миттєвих значень вихідних (кінцевих) впливів; $Y = \{u: T \rightarrow y\}$ – множина вихідних величин; $\eta = \{T \times T \times T \times c \rightarrow W\}$ – перехідна функція стану; $T \times W \rightarrow y$ – вихідне відображення; c – відрізок вхідного впливу; u – відрізок в вихідної величини.

При охопленні широкого діапазону властивостей системи при застосуванні залежності (1) виникають складнощі у її інтерпретації та практичному застосуванні при необхідності забезпечення параметрів, процесів та ієрархії технічної системи за допомогою її функціонального опису [9,10].

Загальна ефективність системи визначається вектором функціоналом [9]:

$$E = \{E_s\}, \quad (2)$$

$$E_s = E_s(\psi_s) = E_s(F_1^{(1)}, F_2^{(1)}, \dots, F_n^{(1)}) = E_s(\{F_i^{(1)}\}), \quad i = \overline{1, n}; s = \overline{1, N}, \quad (3)$$

де ψ_s, F_i – відповідно множини функцій системи та процесів, що їх реалізують.

Раціональний шлях формування функціонального опису полягає у застосуванні багаторівневої ієрархії інформаційного забезпечення [6,7], при якій опис вищого рівня забезпечуватиметься

узагальненими та факторизованими змінними нижчого рівня. Ієрархія створюється порівневою факторизацією процесів $\{F_i\}$ за допомогою узагальнених параметрів $\{Q_j\}$, що є функціоналами $\{F_i\}$ при кількості параметрів значно меншій числа змінних [9].

Процеси першого рівня $\{F_i^{(1)}\}$ (процеси взаємодії із середовищем), що отримують на виході системи, описуються параметрами системи першого рівня $\{Q_j^{(1)}\}$ при $j = \overline{1, m}$, активними протидіючими параметрами середовища $\{b_k\}$ при $k = \overline{1, K}$, нейтральними (випадковими) параметрами середовища $\{c_l\}$ при $l = \overline{1, L}$, сприятливими параметрами середовища $\{d_p\}$ при $p = \overline{1, P}$ [9].

Варіації ефективності системи відносно параметрів середовища та відповідні похідні визначають за формулами [9; 10]:

$$\begin{aligned} \delta \tilde{E}_s(b_k) < 0, \frac{\partial \tilde{E}_s}{\partial b_k} < 0, k = \overline{1, K}; \\ \delta \tilde{E}_s(c_l) < 0, \frac{\partial \tilde{E}_s}{\partial c_l} = 0, l = \overline{1, L}; \\ \delta \tilde{E}_s(d_p) < 0, \frac{\partial \tilde{E}_s}{\partial d_{pl}} > 0, p = \overline{1, P}, \end{aligned} \quad (4)$$

де знак \sim означає усереднення.

Формується наступна ієрархія опису з позиції технологічного успадкування властивостей [2,9]: ефективність (кінцева множина функціоналів) – параметри першого рівня (функціонали) – процеси другого рівня (функції) – параметри другого рівня (функціонали) тощо.

Зовнішні характеристики системи визначаються верхнім рівнем ієрархії, тому часто обмежуються описами виду $\{E_i\}$, $\{\psi_s\}$, $\{Q^{(i)}\}$, $\{b_k\}$, $\{c_l\}$, $\{d_p\}$. Число рівнів ієрархії визначається регламентованою точністю вихідних параметрів [9,10].

За умови $E=E(Q^{(i)})$, $Q^{(i)}=Q^{(i)}(b, c, d)$ залежність (1) трансформується у вираз:

$$S_F = \{Q^{(1)}(t), Q^{(2)}(t), \dots, Q^{(r)}(t)\}. \quad (5)$$

Поточний стан системи залежить від попереднього і визначається процесами успадкування властивостей, що описується диференційними рівняннями виду [9,10]:

$$\begin{aligned} \varphi^{(r)} [O^{(r)}(t), O^{(r)}(t-\tau); \frac{dO^{(r)}(t-\tau)}{dt}, \dots, \\ \frac{d^i O^{(r)}(t-\tau)}{dt^i}, \dots, \frac{d^n O^{(r)}(t-\tau)}{dt^n}, \dots], \quad (6) \\ \int_{t_i}^t O^{(r)}(\xi) dG_1^{(r)}(\xi, t), \dots, \int_{t_k}^t O^{(r)}(\xi) dG_k^{(r)}(\xi, t) \end{aligned}$$

де $\varphi^{(r)}$, $G_k^{(r)}$ – деякі функції; $S_F = \{O^{(1)}(t), O^{(2)}(t), \dots, O^{(r)}(t)\}$ – функціональний опис системи; $O^{(1)} = O^{(1)}(b, c, d, \dots)$ – виходи системи; (b, c, d, \dots) – її входи.

Морфологічний опис системи задається чотирма важливими параметрами [10]:

$$S_M = \{\Sigma, V, \sigma, K\}, \quad (7)$$

де $\Sigma = [\Sigma_i]$ – множина елементів і їх властивостей; $V = [V_j]$ – множина зв'язків; σ – структура; K – композиція.

Функціональний і морфологічний описи формуються відповідно до ієрархічного принципу шляхом декомпозиції підсистем, які повинні співпадати [6,9,11].

Функціональний опис α -го рівня та морфологічний опис χ -го рівня представляють залежностями [9]:

$$\begin{aligned} \alpha S_F = \{T_{\alpha}, x_{\alpha}, C_{\alpha}, W_{\alpha}, y, \\ \alpha Y_{\alpha}, \phi_{\alpha}, \eta\} = \bigcup_i \alpha+1 S_{F_i}, \end{aligned} \quad (8)$$

$$\chi S_M = \{\chi \Sigma_{\chi}, V_{\chi}, \sigma_{\chi}, K\} = \bigcup_i \chi+1 S_{M_i}. \quad (9)$$

Функціональні процеси у системі безпосередньо пов'язані із інформаційними, при цьому джерелом інформації для її функціонування є внутрішній ресурс і середовище, а носієм – речовина (морфологічна інформація) та енергія. Внутрішня енергія характеризує еволюцію, цілі та діяльність системи [6,7,9].

З позиції адитивності інформації I для множини R_0, N незалежних рівно імовірних реалізацій системи $R_0 \in [R_{01}; R_{0N}]$ функціональна залежність [7]:

$$I \left(\prod_{i=1}^N R_{0i} \right) = I(R_{01}) + \dots + I(R_{0N}), \quad (10)$$

має єдиний розв'язок [6,7]:

$$I = K \ell n(R_0), \quad (11)$$

де $K = \log_b(e)$ – константа; індекс b описує індивідуальні особливості частин або підсистем [6]; $b=2$ при вираженні інформації в бітах [6,9].

Кількісною характеристикою при еволюції інформаційних потоків служить інформація на один символ i [6,7]:

$$i = -K \sum_{j=1}^k p_j \cdot \ell n(p_j), \quad (12)$$

де p_j – імовірність j -того стану системи із k можливих.

Сумарна інформація, що характеризує перехід з одного стану системи в інший за умови

безпосереднього взаємозв'язку між невизначеністю стану об'єкта та його фізичними властивостями [6,7]:

$$I = -k \cdot \sum_{j=1}^k p_i \cdot \log_b(p_i). \quad (13)$$

Встановлено [7,9], що частина підсистем $q_j = q^{(var)} \in (j=1 \dots m)$ відповідає нестійким модам, а інша – $q_j = q^{(s)} \in (j=m+1 \dots k)$ – підпорядковується стійким.

При переведенні систем внаслідок самоорганізації у стан $q^{(s)}$ вплив флуктуацій та оптимізаційних критеріїв приводить до їх еволюції, причому величина флуктуації параметра порядку має вирішальне значення на характер функціонування систем [6,7].

В самоорганізованих системах керування їх адаптивністю та надійністю здійснюється умовами формування та величинами флуктуацій за рахунок зміни кількості підсистем [7,11]. При адитивності величини повного виходу для підпорядкованим стійким модам інформаційних підсистем, що підпорядковується стійким модам з фіксованим параметром порядку, отримаємо [7]:

$$q^{(s)} = q_d^{(s)} + q_r^{(s)}, \quad (14)$$

де $q_d^{(s)}$, $q_r^{(s)}$ – відповідно чітко визначений детермінований і флуктуючий (з розсіяними характеристиками) входи.

Загальна величина виходу описується залежністю [7]:

$$q_{\Sigma} = \sum_s q^{(s)} = \sum_{j=m+1}^k q_j, \quad (15)$$

Відповідно до граничної центральної теореми для взаємно незалежних випадкових змінних повний вихід системи (15) збільшується пропорційно числу підсистем s або реалізуючих їх характеристик і критеріїв, флуктуації зростають лише як \sqrt{s} (в реальних процесах пригнічення розсіювання характеристик відбувається ще інтенсивніше).

Поблизу точки виникнення нестійкості за рахунок істотної відмінності стійкі моди підлаштовуються під нестійкі і можуть бути виключені, що приводить упорядкування за рахунок значного зменшення ступенів вільності [6,7].

Встановлено [6,11,12], що перетворення підведеної ззовні до системи енергії на мікроскопічному рівні внаслідок еволюції призводить до впорядкованості на макроскопічному рівні.

Згідно синергетичного підходу технологічне забезпечення регламентованих показників якості виробів відповідно до необхідних експлуатаційних характеристик і показників надійності реалізується

обмеженою кількістю раціональних варіантів взаємодій виробу із технологічним середовищем при необхідній кількості стійких зв'язків в інформаційно-технологічній системі підготовки виробництва виробів на етапах і стадіях його життєвого циклу [3,8].

Поряд з тим вибір раціональних критеріїв оптимізації при вирішенні технологічних задач, зокрема, розрахунку припусків на механічне оброблення заготовок, на етапах конструкторської та технологічної підготовки виробництва дозволяє забезпечити необхідні вихідні параметри виробів і їх експлуатаційні характеристики при виготовленні та складанні і прогнозувати поведінку деталей і машин на стадії експлуатації їх життєвих циклів.

Мета дослідження

Мета дослідження полягає у розробленні методики вибору раціонального припуску на оброблення поверхонь литої заготовки із врахуванням технологічної спадковості властивостей матеріалу.

Виклад основного матеріалу

Методи визначення припуску на механічне оброблення виробів

Якість кінцевої деталі визначається мінімальною кількістю матеріалу, який видаляють в процесі обробки різанням. Для заготовок, отриманих литвом і обробкою тиском, шар матеріалу, який дозволяє забезпечити бажану точність розмірів і якість поверхневих шарів виробів, визначається як припуск на механічну обробку [13,14].

Факторами, що необхідно враховувати при проектуванні литих заготовок, є усадка матеріалу, поверхневі забруднення, жолоблення та відхилення форми і взаємного розташування поверхонь [13].

Припуск на механічне оброблення функціональної поверхні деталі повинен компенсувати суму трьох параметрів: похибок оброблення на окремих технологічних переходах, кількості матеріалу, який необхідно видалити для досягнення регламентованої якості поверхні, і помилки позиціонування на металорізальному верстаті [14].

Припуск на оброблення поверхонь деталі може бути призначений згідно відповідних довідкових таблиць, ГОСТів або на основі розрахунково-аналітичного методу визначення припусків. Граничні значення припусків коректуються на етапі розмірного аналізу технологічного процесу механічного оброблення виробу [15].

Розрахунково-аналітичний метод визначення припусків на оброблення (РАМВП), розроблений проф. В.М. Кованом, базується на аналізі факторів, що впливають на припуски попереднього та виконаного переходів технологічного процесу оброблення поверхні. Значення припуску

визначається методом диференційованого розрахунку по елементах, що складають припуск. РАМВП передбачає розрахунок припусків згідно всіх послідовно виконуваних технологічних переходів оброблення даної поверхні деталі (проміжні припуски), їх сумування для визначення загального припуску на оброблення поверхні та розрахунок проміжних розмірів, що визначають положення поверхні, та розмірів заготовки [15].

Значення мінімального припуску при обробленні деталей машин визначають за формулами [15]:

а) для циліндричних поверхонь (двосторонній припуск)

$$2z_{\min i} = 2 \cdot \left(R_{Z_{i-1}} + T_{i-1} + \sqrt{\rho_{i-1}^2 + \varepsilon_i^2} \right), \quad (16)$$

б) для плоских поверхонь (односторонній припуск)

$$2z_{\min i} = R_{Z_{i-1}} + T_{i-1} + \rho_{i-1} + \varepsilon_i, \quad (17)$$

в) для плоских поверхонь (двосторонній припуск)

$$2z_{\min i} = 2 \cdot \left(R_{Z_{i-1}} + T_{i-1} + \rho_{i-1} + \varepsilon_i \right), \quad (18)$$

де $R_{Z_{i-1}}$ – шорсткість, досягнута на попередньому переході, мкм (мм); T_{i-1} – глибина дефектного шару, який отриманий на попередньому переході, мкм (мм); ρ_{i-1} – просторове відхилення заготовки, отримане на попередньому переході, мкм, (мм); ε_i – похибка встановлення на даному переході, мкм (мм).

У формулах (16)–(18) враховуються спадкові властивості оброблюваного матеріалу на мікроскопічному (геометричні та фізико-механічні параметри якості поверхневого шару) і макроскопічному (відхилення форми і взаємного розташування поверхонь) рівнях досліджень.

Метою розмірного аналізу технологічного процесу механічного оброблення виробу є визначення граничних значень припуску на механічне оброблення, відправні розміри заготовки та міжопераційні розміри для коректного заповнення технологічної документації [15].

Для запропонованих методів розрахунку припусків не враховуються процеси деградації структури оброблюваного матеріалу при еволюції технологічних дефектів за умови неоптимального маршруту оброблення визначеної функціональної поверхні виробу.

Технологічна пошкоджуваність матеріалу як критерій оптимізації при вирішенні технологічних задач

У загальному випадку, пошкоджуваність – це процес різко вираженої та нерівномірної зміни геометричного стану поверхонь тертя, структури і властивостей поверхневих шарів. Пошкодження – результат пошкоджуваності, що проявляється у зміні макрогеометричних характеристик, структури,

властивостей і напруженого стану поверхневих шарів деталі [16].

З іншої сторони, із аналізу життєвого циклу виробу випливає, що технологічні пошкодження є результатом його експлуатації внаслідок «переродження» технологічних дефектів, утворених на стадії створення виробу.

Процеси еволюції пошкоджень від стадії створення виробу до стадії його експлуатації життєвого циклу є багатомасштабними та багатостадійними. Вони розвиваються одночасно на субмікроскопічному, мікроскопічному та макроскопічному рівнях, що означає суміщення різних видів моделей. Багатостадійність процесів вимагає нових підходів і методик для вирішення технологічних завдань залежно від умов експлуатації виробу [17].

Тому пошкодження – результат пошкоджуваності, що проявляється у зміні макрогеометричних характеристик, структури, властивостей і напруженого стану поверхневих шарів виробу при його експлуатації внаслідок еволюції дефектів, сформованих на стадії створення виробу [16].

Поряд з тим, для виявлення причини виходу виробу з ладу внаслідок його пошкодження необхідно проаналізувати весь технологічний ланцюг від заготовки до кінцевої деталі для її виконавчих поверхонь відповідно до технологічного успадковування властивостей [2,3].

Згідно положень механіки пошкоджуваного середовища [12]:

$$\tilde{M} = \frac{M}{1 - D_M}, \quad (19)$$

де M , \tilde{M} – відповідно значення істинної та ефективної властивості матеріалу; D_M – кінетика накопичення пошкоджень (пошкоджуваність) для заданої властивості матеріалу.

Встановлено, що основними домінуючими параметрами вичерпання ресурсу матеріалу є процеси накопичення пошкоджень, пов'язані з розпушуванням матеріалу, що призводить до деградації його модуля пружності та інших фізико-механічних властивостей для двох видів руйнування: на відрив – E та зріз – G . Параметром оцінки деградації матеріалу для різних експлуатаційних умов є пошкоджуваність матеріалу при осьовому навантаженні – D_σ та при зсуві – D_τ [16,18]:

$$D_\sigma = 1 - \sqrt{\frac{\tilde{E}_t}{E_0}}, \quad (20)$$

$$D_\tau = 1 - \sqrt{\frac{\tilde{G}_t}{G_0}}. \quad (21)$$

Застосування залежностей (20), (21) в інженерній практиці вимагає спеціального обладнання та кваліфікованого персоналу при проведенні експериментальних досліджень, тому є складно реалізованим на машинобудівному підприємстві [16].

При вирішенні прикладних завдань застосовують метод ЛМ–твердості, розроблений під керівництвом академіка А.О. Лебедева. За параметр пошкоджуваності для методу ЛМ–твердості прийнято не абсолютне значення, а ступінь розсіювання характеристик механічних властивостей матеріалу на зруйнованих зразках після напрацювання при різних рівнях напружень. Даний метод найпростіше реалізувати, використовуючи як механічну характеристику твердість, значення якої застосовують для непрямої оцінки властивостей матеріалів [19–21].

Параметром, що інтегрально характеризує стан матеріалу під час опрацювання результатів вимірювань твердості, є гомогенність, яка оцінюється за коефіцієнтом Вейбулла (m) [20]:

$$m = \frac{d(n)}{2.30259 \cdot S(\lg(H))}, \quad (22)$$

де $d(n)$ – параметр, що визначається кількістю вимірювань n ;

$$S(\lg(H)) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (\lg(H_i) - \overline{\lg(H)})^2}, \quad (23)$$

$$\overline{\lg(H)} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \lg(H_i). \quad (24)$$

Оцінку деградації властивостей матеріалу виробу можна здійснювати також за коефіцієнтом варіації [20]:

$$v = \frac{1}{\overline{H}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (H_i - \overline{H})^2}}, \quad (25)$$

де \overline{H} – середнє значення твердості.

Для оцінки фактичної пошкодженості матеріалу внаслідок еволюції технологічних дефектів у технологічні пошкодження після напрацювання авторами [19,21] запропоновано параметр Δm , а для оцінки інтенсивності зростання пошкодженості – характеристику δ :

$$\Delta m = \frac{m_n - m_{nm}}{m_n}, \quad (26)$$

$$\delta = \frac{m_n - m_{nm}}{m_{nm}}, \quad (27)$$

де m_n, m_{nm} – значення коефіцієнтів гомогенності Вейбулла (m), виміряні відповідно для початкового і поточного стану матеріалу виробу.

При виготовленні виробу за відомим розподілом коефіцієнта гомогенності Вейбулла (m) доцільно оцінювати деградацію структури матеріалу за його технологічною пошкоджуваністю D [2,22,23]:

$$D = 1 - \frac{m_i}{m_{matr.}}, \quad (28)$$

де m_i – значення коефіцієнта Вейбулла для i -го із n перерізів; $m_{matr.}$ – значення коефіцієнта Вейбулла для основного матеріалу виробу.

Матеріали, експериментальні зразки, методика проведення експериментальних досліджень

У піщану форму було відлито плоску заготовку із розмірами 165x155x22 мм з матеріалу АК21М2.5Н2.5 ГОСТ 1853–93 (табл. 1). Після кристалізації профрезерували базову поверхню на вертикально–фрезерному верстаті 6Р12 кінцевою фрезою $\varnothing 30$ мм та розділили відправний зразок на три зразки з концентраторами напружень: з малим і великим випорами та ливником (рис. 2). Метою експериментальних досліджень було встановити динаміку деградації структури матеріалу від поверхні до основного матеріалу при наближенні до конструктивних концентраторів напружень та виявити величину припуску, що підлягає видаленню у стружку, як шару матеріалу із максимальною кількістю технологічних пошкоджень.

Таблиця 1 – Хімічний склад матеріалу виливки

| Хімічний елемент | Відсоток, % |
|------------------|--------------|
| Al | 70.953±0.080 |
| Si | 23.219±0.078 |
| Cu | 2.895±0.012 |
| Fe | 1.119±0.011 |
| Zn | 1.096±0.006 |
| Mn | 0.255±0.008 |
| Cr | 0.184±0.008 |
| S | 0.114±0.007 |
| Ni | 0.084±0.003 |
| Ti | 0.083±0.013 |

Для цього торцеві сторони зразків оброблялися на універсально–фрезерному верстаті мод. 676 ($B=2$ мм; $t=45$ мм; $S_{хв.}=42$ мм/хв; $n=640$ хв⁻¹) кінцевою фрезою $\varnothing 45$ мм ($z=2$), причому було проведено дві серії механічного оброблення.

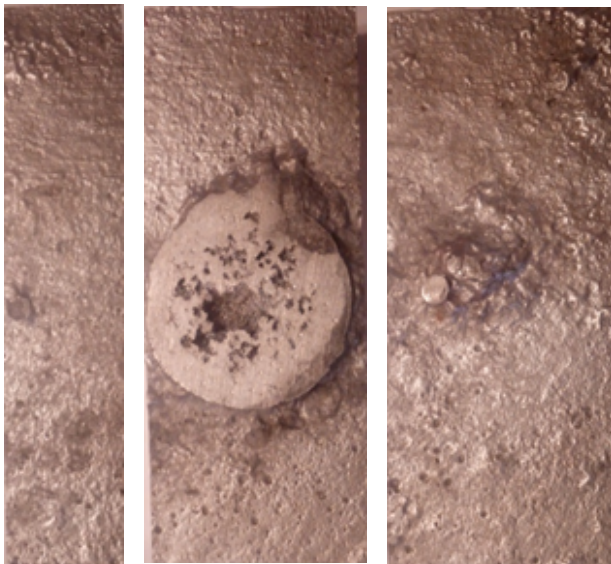
Після кожного фрезерування вимірювали твердість у п'яти перерізах на відстанях 2, 4, 7, 12, 17 мм від поверхні виливка. Вибір диференційованого кроку сітки (при його збільшенні від поверхні вглиб

основного матеріалу) обумовлений особливостями формування властивостей виробу

Вимірювання здійснювали для зразків 1, 2 (рис. 1) на приладі ТР-5006 ГОСТ 23677-79 за шкалою Н за допомогою кульки Ø 3.175 з навантаженням 588.4 Н за стандартною методикою [2]. Для кожного експерименту проводили по 30 вимірювань твердості матеріалу виливка.

Статистичне опрацювання та обговорення результатів досліджень

За результатами експериментальних досліджень було розраховано коефіцієнти гомогенності Вейбулла (m) за формулами (22-24) і технологічну пошкоджуваність матеріалу виливка D за формулою (28) в середовищі Mathcad 15. Зміна коефіцієнта гомогенності (m) і технологічної пошкоджуваності D по товщині (глибині) заготовки приведена на рис. 2.



1 – Зразки для експериментальних досліджень:
1 – з малим випором; 2 – з ливником;
3 – з великим випором

Результати експериментальних досліджень структури та пошкоджуваності литої заготовки показали:

1. Максимальна кількість технологічних пошкоджень характерна для структурних зон матеріалу на глибині до 2 мм від поверхні для зразка із ливником: в більшій мірі – зі сторони малого випора, в меншій – зі сторони великого випора (рис. 2). Це обумовлено специфікою процесу кристалізації матеріалу, наявністю домішок, неоднорідностей у поверхневому шарі та раковини, зміщеної від вісі симетрії у сторону малого випора, і підтверджується найменшими значеннями коефіцієнта гомогенності Вейбулла (m), а також найбільшими значеннями пошкоджуваності D . Для зразка із малим випором

коефіцієнти гомогенності Вейбулла (m) є більші, а значення пошкоджуваності D є менші, що пояснюється зростанням віддалі від ливника. Тому шар металу на глибині 2 мм від поверхні підлягає механічному обробленню для всіх видів заготовок.

2. При переміщенні вглиб матеріалу від 2 до 4 мм спостерігається динаміка зменшення пошкоджуваності для зразка з малим випором для першої та другої серії дослідів (рис. 2). У той же час в перерізі зі сторони від ливника пошкоджуваність є вищою, що свідчить про вплив елементів конструкції форми на розподіл домішок і неоднорідностей по перерізу виливка. Для зразка із ливником пошкоджуваність зростає при переміщенні до усадкової раковини для другої серії дослідів.

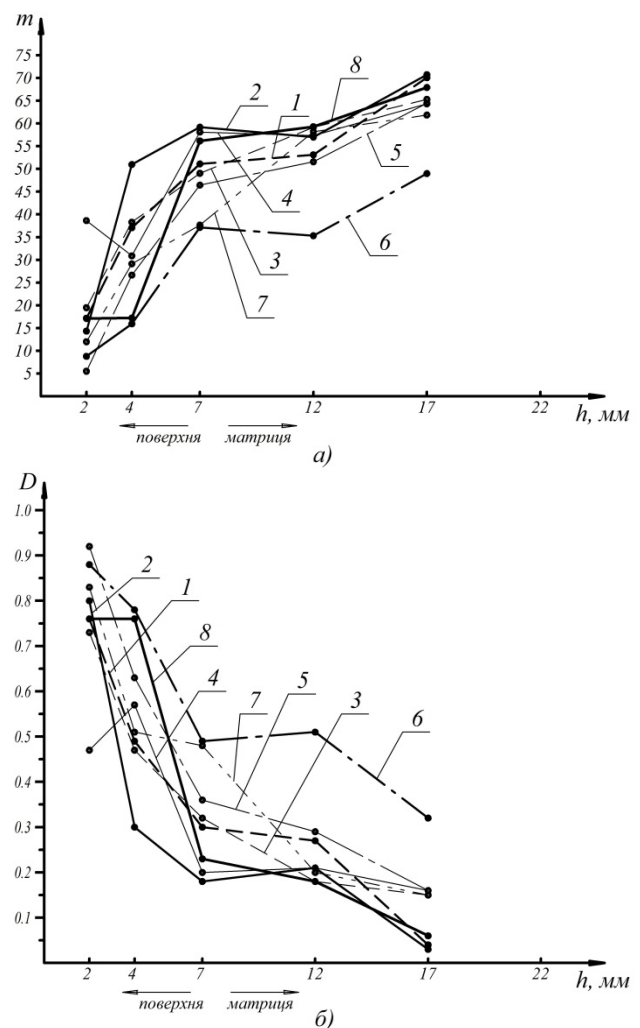


Рис. 2 – Графік залежності коефіцієнта гомогенності (m) (а) і пошкоджуваності матеріалу D (б) по висоті для зразків 1 і 2 (рис. 2) : 1, 2 – від випора малого для першої та другої серії дослідів відповідно; 3, 4 – з протилежного торця від випора малого для першої та другої серії дослідів відповідно; 5, 6 – для ливника зі сторони випора малого для першої та другої серії дослідів відповідно; 7, 8 – для ливника зі сторони випора великого для першої та другої серії дослідів

3. На глибині заготовки від 4 до 17 мм відбувається подальше зменшення технологічної пошкоджуваності матеріалу, причому стабілізація процесу має місце, починаючи із глибини 7 мм, що підтверджується зростанням значень коефіцієнта гомогенності Вейбулла (m) і їх наближенням до раціональних значень, характерних для перерізу із найшвидшим застиганням розплаву (рис. 2). Однак для перерізу ливника зі сторони малого випора переміщення до центру ливника (друга серія дослідів) супроводжується зменшенням значень коефіцієнта гомогенності Вейбулла (m) у цих перерізах, що пояснюється впливом усадкової раковини на формування домішок та фізичних і хімічних неоднорідностей структури.

4. На підставі аналізу результатів експериментальних досліджень (рис. 2) встановлено, що для зразка із випором мінімальне значення припуску – 4 мм зі сторони власне випора і 7 мм з протилежного торця від випора малого. Для зразка із ливником мінімальне значення припуску зі сторони великого випора дорівнює 7 мм. Переріз ливника зі сторони малого випора за рахунок ливарної раковини характеризується схильністю до технологічної пошкоджуваності навіть на глибині до 17 мм, тому доцільно цю заготовку утилізувати.

Висновки та перспектива подальших досліджень

Розроблено методику визначення припуску на механічне оброблення виробів за ступенем деградації механічних властивостей їхнього матеріалу. Запропоновано критерій технологічної пошкоджуваності матеріалу із врахуванням технологічного успадкування його властивостей для вирішення інженерних задач при виготовленні машинобудівних виробів. Подальші дослідження у цьому напрямку пов'язані з оптимізацією значень припусків для ширшої номенклатури матеріалів із врахуванням технологічного успадкування їх властивостей при проектуванні технологічних процесів для впровадження запропонованої методики у практику сучасного машинобудування.

Список літератури

1. Gubaydulina R. H., Gruby S. V., Davlatov G. D. Analysis of the Lifecycle of Mechanical Engineering Products. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2016. Vol. 142 (1). 012060. doi: 10.1088/1757-899X/142/1/012060.
2. Kusiya Ya., Stupnytskyy V. Optimization of the Technological Process Based on Analysis of Technological Damageability of Casting. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing III. Proceedings of the 3rd International Conference on Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange, DSMIE-2020, June 9-12, 2020, Kharkiv, Ukraine*. 2020. Vol. 1: Manufacturing and Materials Engineering. P. 276–284. doi: 10.1007/978-3-030-50794-7_27.
3. Blumenstein V., Rakhimyanov K., Heifetz M., Kleptsov A.

Problem of technological inheritance in machine engineering. *AIP Conference Proceedings*. 2016. Vol. 1698 (1). P. 2–7. doi: 10.1063/1.4937831.

4. Aftanaziv I. S., Shevchuk L. I., Strutynska L. R., Strogan O. I. Vibrational–centrifugal surface strengthening of drill and casing pipes. *Scientific Bulletin of National Mining University*. 2018. Iss. 5. P. 88–97. doi: 10.29202/nvngu/2018-5/7.
5. Stupnytskyy V. Features of Functionally–Oriented Engineering Technologies in Concurrent Environment. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*. 2013. Vol. 2. Issue 9. P. 1181–1186.
6. Haken H., Portugali J. *Information Adaptation: The Interplay Between Shannon Information and Semantic Information in Cognition*. Berlin: Springer, 2015. 90 p. doi: 10.1007/978-3-319-11170-4_6.
7. Haken H. *Information and Self–Organization. A Macroscopic Approach to Complex Systems: Third Enlarged Edition*. Berlin: Springer, 2006. 258 p. doi: 10.1007/3-540-33023-2.
8. Божидарнік В. В., Григор'єва Н. С., Шабайкович В. А. *Технологія виготовлення деталей виробів: навч. посібник*. Луцьк: Надтир'я, 2006. 612 с.
9. Дружинин В. В., Конторов Д. С. *Проблеми системології: проблеми теорії складних систем*. Москва: Сов. Радио, 1976. 296 с.
10. Калман Р. Э., Фалб П. Л., Арбіб М. А. *Очерки по математической теории систем*: пер. с англ. / под ред. Я.З. Цыпкина. Москва: Едиториал УРСС, 2004. 400 с.
11. Vallejo J. C., Sanjuan M.A.F. Predictability of Chaotic Dynamics. A Finite–time Lyapunov Exponents Approach. *Springer Series in Synergetics*, 2019. 198 p. doi: 10.1007/978-3-319-51893-0.
12. Haake F., Gnutzmann S., Kuš M. Quantum Signatures of Chaos. *Springer Series in Synergetics*, 2018. 660 p. doi: 10.1007/978-3-319-97580-1.
13. Denkena B., Jacob S. Approach for Increasing the Resource Efficiency for the Production Process of Titanium Structural Components. *Procedia CIRP*. 2015. Vol. 35. P. 45–49. doi: 10.1016/j.procir.2015.08.054.
14. Fuchs C., Baier D., Semm T. [et al] Determining the machining allowance for WAAM parts. *Prod. Eng. Res. Devel.* 2020. № 14. P. 629–637. doi: 10.1007/s11740-020-00982-9.
15. Юрчишин І. І., Литвиняк Я. М., Грицай І. Є. [та ін.] *Технологія машинобудування: Посібник–довідник для виконання кваліфікаційних робіт: навч. посібник*. Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2009. 528 с.
16. Кусий Я. М. Оптимізація маршруту оброблення поверхонь заготовки за критерієм однорідності структури матеріалу. *Системні технології*. 2021. № 1 (132). С. 76–91. doi: 10.34185/1562-9945-1-132-2021-06.
17. Lian J., Sharaf M., Archie F., Muenstermann S. A hybrid approach for modelling of plasticity and failure behaviour of advanced high–strength steel shetts. *International Journal of Damage Mechanics*. 2013. № 22 (2). P. 188–218. doi: 10.1177/1056789512439319.
18. Murakami S. *Continuum Damage Mechanics – A Continuum Mechanics Approach to the Analysis of Damage and Fracture*. Springer, Dordrecht, Heidelberg, London, New York, 2012. 402 p. doi: 10.1007/978-94-007-2666-6.
19. Швець В. П., Музика М. Р., Маковецький І. В. [і ін.] Контроль поточного стану металу стрілкового переводу в процесі напрацювання. *Проблеми прочності*. 2011. № 1. С. 104–108.

20. Лебедев А. А., Ламашевский В. П., Музыка Н. Р. [и др.] Кинетика накопления рассеянных повреждений в поликристаллических материалах с разным размером зерна при малых деформациях. *Проблемы прочности*. 2011. № 5. С. 32–44.
21. Музыка Н. Р., Швец В. П., Маковецкий И. В. Оценка повреждаемости подвергнутого рекристаллизации металла при последующем деформировании. *Проблемы прочности*. 2013. № 1. С. 91–100.
22. Kusyi J., Kuk A. Investigation of the technological damageability of castings at the stage of design and technological preparation of the machine Life Cycle. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. Vol. 1426 (1).
23. Kusyi J., Kuk A. Analysis of the rational route of aluminium alloy castings mechanical treatment on the basis of the reliability criterion. *ANNALS of Faculty Engineering Hunedoara. International Journal of Engineering*. 2020. Vol. 18 (1). P. 101–108.
10. Kalman R. E., Falb pp. L., Arbib M. A. *Ocherki po matematicheskoy teorii sistem*: Per. s angl. / Pod red. Ya.Z. Cypkina. Izd. 2–e, ster. M. Editorial URSS, 2004. 400 s.
11. Vallejo J.C., Sanjuan M.A.F. *Predictability of Chaotic Dynamics. A Finite–time Lyapunov Exponents Approach*. Springer Series in Synergetics, 2019, 198 p., doi: 10.1007/978-3-319-51893-0.
12. Haake F., Gnutzmann S., Kuś M. *Quantum Signatures of Chaos*. Springer Series in Synergetics, 2018, 660 p. doi: 10.1007/978-3-319-97580-1.
13. Denkena B., Jacob S. Approach for Increasing the Resource Efficiency for the Production Process of Titanium Structural Components. *Procedia CIRP*, 2015, Vol. 35, pp. 45–49, doi: 10.1016/j.procir.2015.08.054.
14. Fuchs C., Baier D., Semm T. [et al] Determining the machining allowance for WAAM parts. *Prod. Eng. Res. Devel*, 2020, no 14, pp. 629–637, doi: 10.1007/s11740-020-00982-9.
15. Yurchy'shy'n I.I., Ly'tvy'nyak Ya. M., Gry'czaj I.Ye. [et al] *Tekhnolohiia mashynobuduvannia: Posibnyk–dovidnyk dlia vykonannia kvalifikatsiynykh robot: navch. posibnyk [Mechanical Engineering Technology: Handbook for qualification work: textbook. manual] L'viv. Vy'davny'cztvo Nacional'nogo universy'tetu "L'viv'ska politexnika"*, 2009, 528 p.
16. Kusyi Ya. M. Optymizatsiia marshrutu obroblennia poverkhn zahotovky za kryteriiem odnorodnosti struktury materialu [Optimization of the route of processing of surfaces of preparation by criterion of homogeneity of structure of material]. *Systemni tekhnolohii [System technologies.]*, 2021, no. 1(132), pp. 76–91, doi: 10.34185/1562-9945-1-132-2021-06.
17. Lian J., Sharaf M., Archie F., Muenstermann S. A hybrid approach for modelling of plasticity and failure behaviour of advanced high–strength steel shetts. *International Journal of Damage Mechanics*, 2013, № 22 (2), pp. 188–218, doi: 10.1177/1056789512439319.
18. Murakami S. *Continuum Damage Mechanics – A Continuum Mechanics Approach to the Analysis of Damage and Fracture*. Springer, Dordrecht, Heidelberg, London, New York, 2012, 402 p., doi: 10.1007/978-94-007-2666-6.
19. Shvets V. pp., Muzyka M. R., Makovetskyi I. V. [et al.] Kontrol' potochного стану металу стрілкового переводу в процесі напругування [Control of the current state of the metal of the turnout in the process of operation]. *Problemy prochnosti [Strength problems]*, 2011, no 1, pp. 104–108.
20. Lebedev A. A., Lamashevskij V. pp., Muzyka N. R. [et al] Кинетика накопления расseyанных повrezhdenij в поликристаллических материалах с разным размером зерна при малых деформациях. *Problemy prochnosti [Strength problems]*, 2011, no 5, pp. 32–44.
21. Muzyka N. R., Shvec V. pp., Makoveckij I. V. Ocenka povrezhdaemosti podvergnutogo rekristallizacii metalla pri posleduyushem deformirovanii [Assessment of damageability of recrystallized metal during subsequent deformation]. *Problemy prochnosti [Strength problems]*, 2013, no 1, pp. 91–100.
22. Kusyi J., Kuk A. Investigation of the technological damageability of castings at the stage of design and technological preparation of the machine Life Cycle. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, Vol. 1426 (1).
23. Kusyi J., Kuk A. Analysis of the rational route of aluminium alloy castings mechanical treatment on the basis of the reliability criterion. *ANNALS of Faculty Engineering Hunedoara. International Journal of Engineering*, 2020, Vol. 18 (1), pp. 101–108.

References (transliterated)

1. Gubaydulina R. H., Gruby S. V., Davlatov G. D. Analysis of the Lifecycle of Mechanical Engineering Products. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, Vol. 142 (1), 012060, doi: 10.1088/1757-899X/142/1/012060.
2. Kusyi Ya., Stupnytskyy V. Optimization of the Technological Process Based on Analysis of Technological Damageability of Casting. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing III. Proceedings of the 3rd International Conference on Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange, DSMIE–2020, June 9–12, 2020, Kharkiv, Ukraine*. Manufacturing and Materials Engineering, 2020, Vol. 1, pp. 276–284, doi: 10.1007/978-3-030-50794-7_27.
3. Blumenstein V., Rakhimyanov K., Heifetz M., Kleptzov A. Problem of technological inheritance in machine engineering. *AIP Conference Proceedings*, 2016, Vol. 1698 (1), pp. 2–7, doi: 10.1063/1.4937831.
4. Aftanaziv I. S., Shevchuk L. I., Strutynska L. R., Strogan O. I. Vibrational–centrifugal surface strengthening of drill and casing pipes. *Scientific Bulletin of National Mining University*, 2018, Issue 5, pp. 88–97, doi: 10.29202/nvngu/2018-5/7.
5. Stupnytskyy V. Features of Functionally–Oriented Engineering Technologies in Concurrent Environment. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 2013, Vol. 2, Issue 9, pp. 1181–1186.
6. Haken H., Portugali J. *Information Adaptation: The Interplay Between Shannon Information and Semantic Information in Cognition*. Berlin. Springer, 2015, 90 p., doi: 10.1007/978-3-319-11170-4_6.
7. Haken H. *Information and Self–Organization. A Macroscopic Approach to Complex Systems: Third Enlarged Edition*. Berlin. Springer, 2006, 258 p., doi: 10.1007/3-540-33023-2.
8. Bozhydarnik V. V., Hryhorieva N. S., Shabaikovych V. A. *Texnologiya vy'gotovlennya detalej vy'robiv: navch. posibny'k [Technology of manufacturing parts of products: textbook. manual]*. Lucz'k. Nadsty'r'ya, 2006, 612 p.
9. Druzhinin V. V., Kontorov D. S. *Problemy sistemologii: problemy teorii slozhnyh system [Problems of systemology: problems of the theory of complex systems]*. Moscow. Sov. radio, 1976, 296 p.
10. Kalman R. E., Falb pp. L., Arbib M. A. *Ocherki po matematicheskoy teorii sistem*: Per. s angl. / Pod red. Ya.Z. Cypkina. Izd. 2–e, ster. M. Editorial URSS, 2004. 400 s.
11. Vallejo J.C., Sanjuan M.A.F. *Predictability of Chaotic Dynamics. A Finite–time Lyapunov Exponents Approach*. Springer Series in Synergetics, 2019, 198 p., doi: 10.1007/978-3-319-51893-0.
12. Haake F., Gnutzmann S., Kuś M. *Quantum Signatures of Chaos*. Springer Series in Synergetics, 2018, 660 p. doi: 10.1007/978-3-319-97580-1.
13. Denkena B., Jacob S. Approach for Increasing the Resource Efficiency for the Production Process of Titanium Structural Components. *Procedia CIRP*, 2015, Vol. 35, pp. 45–49, doi: 10.1016/j.procir.2015.08.054.
14. Fuchs C., Baier D., Semm T. [et al] Determining the machining allowance for WAAM parts. *Prod. Eng. Res. Devel*, 2020, no 14, pp. 629–637, doi: 10.1007/s11740-020-00982-9.
15. Yurchy'shy'n I.I., Ly'tvy'nyak Ya. M., Gry'czaj I.Ye. [et al] *Tekhnolohiia mashynobuduvannia: Posibnyk–dovidnyk dlia vykonannia kvalifikatsiynykh robot: navch. posibnyk [Mechanical Engineering Technology: Handbook for qualification work: textbook. manual] L'viv. Vy'davny'cztvo Nacional'nogo universy'tetu "L'viv'ska politexnika"*, 2009, 528 p.
16. Kusyi Ya. M. Optymizatsiia marshrutu obroblennia poverkhn zahotovky za kryteriiem odnorodnosti struktury materialu [Optimization of the route of processing of surfaces of preparation by criterion of homogeneity of structure of material]. *Systemni tekhnolohii [System technologies.]*, 2021, no. 1(132), pp. 76–91, doi: 10.34185/1562-9945-1-132-2021-06.
17. Lian J., Sharaf M., Archie F., Muenstermann S. A hybrid approach for modelling of plasticity and failure behaviour of advanced high–strength steel shetts. *International Journal of Damage Mechanics*, 2013, № 22 (2), pp. 188–218, doi: 10.1177/1056789512439319.
18. Murakami S. *Continuum Damage Mechanics – A Continuum Mechanics Approach to the Analysis of Damage and Fracture*. Springer, Dordrecht, Heidelberg, London, New York, 2012, 402 p., doi: 10.1007/978-94-007-2666-6.
19. Shvets V. pp., Muzyka M. R., Makovetskyi I. V. [et al.] Kontrol' potochного стану металу стрілкового переводу в процесі напругування [Control of the current state of the metal of the turnout in the process of operation]. *Problemy prochnosti [Strength problems]*, 2011, no 1, pp. 104–108.
20. Lebedev A. A., Lamashevskij V. pp., Muzyka N. R. [et al] Кинетика накопления расseyанных повrezhdenij в поликристаллических материалах с разным размером зерна при малых деформациях. *Problemy prochnosti [Strength problems]*, 2011, no 5, pp. 32–44.
21. Muzyka N. R., Shvec V. pp., Makoveckij I. V. Ocenka povrezhdaemosti podvergnutogo rekristallizacii metalla pri posleduyushem deformirovanii [Assessment of damageability of recrystallized metal during subsequent deformation]. *Problemy prochnosti [Strength problems]*, 2013, no 1, pp. 91–100.
22. Kusyi J., Kuk A. Investigation of the technological damageability of castings at the stage of design and technological preparation of the machine Life Cycle. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, Vol. 1426 (1).
23. Kusyi J., Kuk A. Analysis of the rational route of aluminium alloy castings mechanical treatment on the basis of the reliability criterion. *ANNALS of Faculty Engineering Hunedoara. International Journal of Engineering*, 2020, Vol. 18 (1), pp. 101–108.

Відомості про авторів (about authors)

Кусий Ярослав Маркіянович – кандидат технічних наук, доцент, Національний університет «Львівська політехніка», докторант кафедри робототехніки та інтегрованих технологій машинобудування, м. Львів, Україна; ORCID: 0000-0001-5741-486X; e-mail: yaroslav.m.kusyi@lpnu.ua.

Yaroslav Kusyi – PhD, associate professor, Doctoral Candidate of the Department of Robotics and Integrated Mechanical Engineering Technologies, Lviv Polytechnic National University, Ukraine; ORCID: 0000-0001-5741-486X; e-mail: yaroslav.m.kusyi@lpnu.ua.

Топільницький Володимир Григорович – кандидат технічних наук, доцент, Національний університет «Львівська політехніка», кафедра проектування та експлуатації машин, м. Львів, Україна; ORCID: 0000-0001-5246-3400; e-mail: topilnvol@gmail.com.

Volodymyr Topilnytskyi – PhD, associate professor, Department of Designing and Operation of Machines, Lviv Polytechnic National University, Ukraine; ORCID: 0000-0001-5246-3400; e-mail: topilnvol@gmail.com.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Кусий Я. М., Топільницький В. Г. Визначення раціонального припуску на оброблення поверхонь заготовки за критерієм технологічної пошкоджуваності. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ», 2021. С. № 1 (7). С. 24-33. doi:10.20998/2413-4295.2021.01.04.

Please cite this article as:

Kusyi Y., Topilnytskyi V. Determination of the rational allowance for blank surface treatment by the criterion of technological damage. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2021. no. 1 (7), pp. 24-33, doi:10.20998/2413-4295.2021.01.04.

Пожалуйста, ссылаетесь на эту статью следующим образом:

Кусый Я. М., Топильницкий В. Г. Определение рационального припуска на обработку поверхностей заготовки по критерию технологической повреждаемости. *Вестник Национального технического университета «ХПИ». Серия: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ», 2021. С. № 1 (7). С. 24-33. doi:10.20998/2413-4295.2021.01.04.

АННОТАЦИЯ При обеспечении машиностроительными изделиями своего служебного назначения реализуется множество причинно-наследственных взаимосвязей как функций отзыва физических процессов и воздействий окружающей среды, приводящих к эволюции качественных показателей изделия его жизненного цикла и формирования условий для физического и морального износа деталей и машин. Рациональное управление технологическим наследованием свойств материала деталей машин для обеспечения их эксплуатационных характеристик и показателей надежности в рамках синергетического подхода служит методологической основой проектирования прогрессивных технологических процессов изготовления изделий. Технологическое обеспечение регламентированных показателей качества изделий реализуется ограниченным количеством рациональных вариантов взаимодействий изделия с технологической средой при необходимом количестве устойчивых связей. Выбор рациональных критериев оптимизации при решении технологических задач, в частности, расчета припусков на механическую обработку заготовок, на этапах конструкторской и технологической подготовок производства позволяет обеспечить необходимые исходные параметры изделий и их эксплуатационные характеристики при изготовлении и сборке и прогнозировать поведение деталей и машин на стадии эксплуатации их жизненных циклов. Разработана методика выбора рационального припуска на обработку поверхностей литой заготовки с учетом технологической наследственности свойств материала. Проанализированы традиционные методы определения припуска на механическую обработку изделий. Предложена технологическая повреждаемость как критерий оптимизации при решении технологических задач. Представлен метод ЛМ-твердости, применяемый для выбора припуска на обработку функциональных поверхностей изделия. Описаны технологическое обеспечение реализации экспериментальных исследований. Проанализированы результаты экспериментальных исследований и установлены рациональные значения припусков обработки плоской заготовки из алюминиевого сплава. Намечены пути дальнейших исследований.

Ключевые слова: жизненный цикл изделия; технологический процесс; технологическая среда; припуск; технологическое наследования; гомогенность; технологическая повреждаемость; заготовка

Надійшла (received) 20.02.2021

УДК 669.14.018.258

doi:10.20998/2413-4295.2021.01.05

ВПЛИВ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ НА ШТАМПОВУ СТАЛЬ 4Х4Н5М4Ф2 ТА ВСТАНОВЛЕННЯ ЇЇ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ

О. М. СИДОРЧУК

відділ № 10, Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України, м. Київ, УКРАЇНА
Центр досліджень і технологій ІПМ Нінбо, м. Нінхай, КИТАЙСЬКА НАРОДНА РЕСПУБЛІКА
e-mail: sedoroleg@ukr.net

АНОТАЦІЯ Наведено результати досліджень після термічної обробки (гартування та відпуску) легованої конструкційної сталі марки 4Х4Н5М4Ф2 в литому та кованому стані. Рекомендовано здійснювати часткову перекристалізацію (неповний відпал) дослідної сталі (4Х4Н5М4Ф2) за температури 750±20 °С. Запропоновано здійснювати термо-деформаційну обробку (ковка за температури 1170±20 °С), що підвищило у два рази бал зерна гартованої сталі та ударну в'язкість у п'ять разів після відпуску. Встановлено оптимальний температурний режим гартування (1095±5 °С) литої та кованої сталі, твердість якої співпадає на рівні 56 HRC. Показано бал зерна в литому та кованому стані (№ 3 – № 6 та № 6 – № 8, відповідно) дослідженої сталі залежно від температури гартування (1050–1110 °С). Встановлена залежність між твердістю та питомою електричною провідністю сталі після гартування у порівнянні з литим та кованим станом. Встановлено, що при оптимізованих режимах термічної обробки дослідженої сталі визначалось за мінімальним значенням параметру – питомої електричної провідності. Так для оптимального значення за температурою гартування сталі (1095 °С) питома електрична провідність становила 0,075 Ом·мм²/м, а при відпуску (595 °С) – 0,0415 Ом·мм²/м. Запропоновано методичний підхід після гартування сталі, що дозволяє проводити контроль температурного режиму при нагріві штампового інструменту. Встановлено, що після гартування сталі, найбільшу провідність має кована, ніж лита сталь. Представлено фізико-механічні властивості (поріг міцності, ударна в'язкість, твердість, мікротвердість у структурі металу та питома електрична провідність) дослідженої гартованої сталі (литої та кованої) після відпуску. Встановлено підвищення твердості та міцності литої сталі при відпуску за температур від 450 до 500 °С, що забезпечується виділенням карбідної складової, де спостерігається інтенсивне підвищення мікротвердості. Встановлено, відпускну крихкість дослідженої сталі за температури 475±15 °С. Показано аномальне зниження ударної в'язкості (до 15 Дж/см²) та інтенсивне підвищення питомої електричної провідності литої та кованої сталі при відпуску крихкості. Встановлено збільшення мікротвердості сталі, що впливає на підвищення зносостійкості та ресурсу експлуатації штампового інструменту. Встановлено, що при повторному нагріві (відпуску), провідність сталі збільшується, а також інтенсивно змінюється структурно-чутлива механічна характеристика (ударна в'язкість), яка підвищується у два рази в інтервалі температур відпуску крихкості 475±15 °С. Це дає можливість підвищити ресурс експлуатації пресового інструменту (філь'єри) зі сталі 4Х4Н5М4Ф2 для гарячого деформування алюмінієвого сплаву в інтервалі робочих температур 450-500 °С.

Ключові слова: штампова сталь; склад; термічна обробка; термо-деформаційна обробка; структура; фізико-механічні властивості

INFLUENCE OF HEAT TREATMENT ON DIE STEEL 4Kh4N5M4F2 AND ESTABLISHMENT OF ITS PHYSICO-MECHANICAL PROPERTIES

O. SYDORCHUK

Department № 10, IPMS NAS of Ukraine, Kyiv, UKRAINE

Ningbo IPMS research and technology center Co., Ltd. No. Ningbo city, Zhejiang Province, PEOPLE'S REPUBLIC OF CHINA

ABSTRACT The results of researches after heat treatment (hardening and tempering) of alloyed structural steel of grade 4Kh4N5M4F2 in cast and forged state are given. It is recommended to carry out partial recrystallization (incomplete annealing) of the experimental steel (4Kh4N5M4F2) at a temperature of 750±20 °C. It is recommended to carry out thermo-deformation treatment (forging at a temperature of 1170±20 °C), which doubled the grain yield of hardened steel and increased the toughness five times after tempering. The optimal temperature mode of hardening (1095±5 °C) of cast and forged steel, the hardness of which coincides at the level of 56 HRC, is established. The grain score in cast and forged state (№ 3–№ 6 and № 6–№ 8, respectively) of the investigated steel depending on the quenching temperature (1050–1110 °C) is shown. The dependence between hardness and specific electrical conductivity of steel after hardening in comparison with cast and forged state is established. It is established that at optimized modes of heat treatment of the investigated steel it was determined by the minimum value of the parameter – specific electrical conductivity. Thus, for the optimal value of the tempering temperature of steel (1095 °C), the specific electrical conductivity was 0,075 Ohm·mm²/m, and at tempering (595 °C) – 0,0415 Ohm·mm²/m. The methodical approach after hardening of steel is offered that allows carrying out control of a temperature mode at heating of the stamp tool. It is established that after hardening of steel, forged has the highest conductivity than cast. Physico-mechanical properties (strength threshold, impact strength, hardness, microhardness in the metal structure and specific electrical conductivity) of the investigated hardened steel (cast and forged) after tempering are presented. An increase in the hardness and strength of cast steel during tempering at temperatures from 450 to 500 °C, which is provided by the release of the carbide component, where there is an intensive increase in microhardness. It was found that the tempering brittleness of the investigated steel at a temperature of 475±15 °C. An anomalous decrease in impact strength (up to 15 J/cm²) and an intensive increase in the specific electrical conductivity of cast and forged steel at tempering brittleness are shown. The increase of microhardness of the investigated steel is established, which promotes increase of wear resistance and increase of service life of the stamping tool. It is established that during reheating (tempering), the conductivity in steel increases, and the structurally sensitive mechanical characteristic (impact strength) changes intensively, which increases twice in the range of tempering brittleness temperatures of 475±15 °C. This makes it possible to increase the service life of the press tool (die) made of steel 4Kh4N5M4F2 for hot deformation of aluminum alloy in the temperature range 450-500 °C.

Keywords: die steel; composition; thermal treatment; thermo-deformation treatment; structure, physical and mechanical properties

Вступ

Штампи та матриці для гарячого деформування кольорових металів та сплавів (головним чином на основі міді та алюмінію) на сьогоднішній день виготовляють зі сталей та сплавів. Жароміцні сталі аустенітного класу для виготовлення штампового інструменту мають ряд недоліків, що обмежують їхнє застосування: понижено теплопровідність та високий коефіцієнт термічного розширення. Їхній вжиток також обмежений через погіршену обробку різанням та високу вартість легуючих елементів.

Тому головним чином на підприємствах відповідного профілю використовують штамповий інструмент феритного класу теплостійких сталей марок 5XHM, 3X3M3Ф, 4X5MФ1С, 5X5MНФС, 4X5B2ФС, 4X3BMФ, 4X4BMФС, 4X2B2MФС, 3X2B8Ф, 5X3B3MФС, 4X2B5MФ, 3X3B9Ф, 6X6M5Ф2, 6X4B9M1Ф і т.д. для гарячого деформування мідних сплавів.

Проте, за робочих температур експлуатації штампового інструменту 600–700 °С при гарячому пресуванні міді та латуні відбувається відпускна крихкість, що призводить до виходу з ладу матриць для гарячого пресування.

За температурних умов експлуатації 900–1000°С при гарячому пресуванні мідно-нікелевого сплаву, штампові сталі феритного класу мають низький ресурс експлуатації. Встановлено, що під дією високих температур та певного навантаження (тиску) при кожному циклі пресування мідного сплаву відбувається пластична деформація поверхневого шару інструменту. Накопичення такої деформації не зміцнює міцності штапвової сталі з ОЦК ґраткою, але може зміцнювати сталі з ГЦК ґраткою. Запропонований новий клас сталі, який за кімнатної температури відноситься до феритного класу, а при експлуатаційній температурі переходить в аустенітну область. Така сталь була названа сталлю з регульованим аустенітним перетворенням під час експлуатації (РАПЕ). Відповідно до [1-3] для виготовлення філь'ер-матриць, що використовують при гарячому деформуванні (температура експлуатації 900–950 °С) мідно-нікелевого сплаву марки МНЖ 5-1 успішно використовується сталь з РАПЕ марки 4X3H5M3Ф. Режими термічної обробки (гартування 1030±10 °С та відпуску 560±10 °С), що задовольняло експлуатувати вироби з неї в процесі аустенізації (за температур вище 860 °С) [1-4]. Проте, для її використання за температури нижче критичної точки дослідженої сталі А₁ (α-Fe область), потребувало скорегувати хімічний склад (4X4H5M4Ф2) та розробити новий режим кінцевої термічної обробки [5-8], що дало змогу підвищити її теплостійкість до температури 650°С.

Правильний вибір хімічного складу сталі та технології термічної обробки можливий лише за рахунок встановлення як природи впливу легуючих компонентів на фізико-механічні властивості, так і на сутність процесів, що відбуваються у сталі, легованій різними компонентами при нагріві вище критичної точки А_{с3} (при гартуванні) та нижче – А_{с1} (при відпуску). Для цього необхідно розробити оптимальні параметри кінцевої термічної обробки (гартування та відпуску) дослідженої сталі з РАПЕ.

Методи дослідження

Виплавку дослідної сталі здійснювали за технологією електрошлакового переплаву в корпорації Tiangong International Co., Ltd (м. Дан'ян, провінція Цзянсу, КНР). Одержано зливки масою по 300 кг, розмірами: Ø 180–220 мм, довжиною 1100 мм. Хімічний склад сталі відповідав маркуванню 4X4H5M4Ф2: 0,40–0,42 % С; 3,8–3,9 % Cr; 5,0–5,1 % Ni; 3,7–3,8 % Mo; 1,7–1,8 % V; 0,014–0,016 % Al; 0,040–0,043 % W; 0,010–0,013 % Co; 0,018–0,020 % Nb; 0,065–0,067 % Cu; 0,002–0,003 % Ca; 0,003–0,005 % N; 0,072–0,075 % Si; 0,23–0,24 % Mn; 0,004–0,005 % S; 0,003–0,004 % P. Вміст вуглецю у сталі визначали за допомогою експрес-аналізаторів АН 7560М та АН 7529М з кулонометричними комірками титрування СО₂ у потоці кисню. Хімічний склад сталі визначали за допомогою стаціонарного спектрометра для аналізу металу SPECTROMAX LMX07 (Німеччина). Метод визначення кількості Cr, Ni, Mo, V, Mn, Si та ін. за спектральним аналізом проводили за ГОСТ 22536.13-77.

Металографічний аналіз зразків сталі, що досліджували проводили на базі металографічної лабораторії відділу 10 (Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України, м. Київ) та Ningbo IPMS research and technology center Co., Ltd. (м. Нінхай, провінція Чжецзян, КНР). Шліфування та полірування шліфів проводили із використанням абразивних матеріалів різної зернистості. Полірування шліфів проводили алмазною пастою різної зернистості згідно ГОСТу 25593-83. Виготовлення шліфів проводили за допомогою приладів: Dincer XQ-2B, Dincer MP-2 та Dincer P-2. Досліджували мікрошліфи сталі після травлення травником наступного складу: 4,0 або 10,0 % розчин азотної кислоти в етиловому спирті з добавкою та без добавки пікринової кислоти за методикою ГОСТ 10243-75. Величину зерна визначали лінійним металографічним аналізом за методикою ГОСТ 5639-82 із використанням світлового металографічного мікроскопу фірми Achua technology Co., Ltd. Мікротвердість досліджували за допомогою цифрової напівавтоматичної системи випробувань мікротвердості EM-4500L (на основі мікротвердоміра МН-5L). Навантаження на алмазну пірамідку становило 10 грамів. Час витримки під навантаженням 11 секунд (EM-4500L).

Питомий електричний опір вимірювали на поверхні зразка (висота зразка становила 2,5 та 5 мм, відстань між електродами вимірюванні становила 5 мм) за допомогою двоканального цифрового електричного вимірювального чотирьохзондового тестера ST2263.

Випробування на твердість проводили на твердомірі HR150A. Пороги плинності та міцності визначали за стандартною методикою випробування на розтяг за ГОСТ 1497-84 на універсальній установці GNT50.

Ударну в'язкість визначали на випробувальній машині NI300 на зразках розмірами 10×10×55 мм без надрізу.

Мета дослідження

Метою роботи є встановлення фізико-механічних властивостей литої та кованої сталі 4X4H5M4Ф2, одержаної електрошлаковим переплавом та термічного зміцнення.

Викладення основного матеріалу

Використовували операцію кування зливок (одержаних електрошлаковим переплавом) масою по 300 кг зі сталі 4X4H5M4Ф2 за температури нагріву 1170 ± 20 °С, під керівництвом компанії «Futec Co., Ltd» (м. Нінхай, провінція Чжецзян, КНР).

Зливки (ливої сталі) та заготовки (кованої сталі) були піддані термічній обробці (відпалу) за температури 750 ± 20 °С. Аналіз результатів досліджень (високотемпературний X-променевиї фазовий аналіз, дилатометричний аналіз та металографічний аналіз) дослідженої сталі з РАПЕ (4X4H5M4Ф2) дозволив визначити критичні точки ($A_1=700$ °С та $A_3=850$ °С), тобто вдалось зменшити значення критичних точок A_1 та A_3 у порівнянні зі сталлю 3X3M3Ф ($A_1=815$ °С та $A_3=875$ °С) та рекомендувати проведення неповного відпалу за температурою 750 ± 20 °С, коли відбувається процес часткової перекристалізації твердого розчину, де утворюється сфероїдизація карбідної складової з твердістю менше 35 HRC, що дозволяє краще обробляти різанням деталі при виготовленні штампового інструменту (філь'єр-матриць, прес-форм, деталей-екструдерів, тощо) [1,2,4].

У [2] температура гартування дослідженої сталі 4X4H5M4Ф2 становила 1030 ± 10 °С і при відпуску 615 °С її твердість становила 40 HRC (за кімнатної температури). Для того, щоб підвищити теплостійкість сталі, було прийняте рішення підвищувати температуру гартування, у супереч усіх літературних посилань при одержанні балу зерна № 10. Бал зерна у структурі металу зменшувався у процесі термічної обробки (гартування). Встановлено, що за температури гартування дослідженої сталі (вище 1110 °С) відбувався процес первинної рекристалізації, що унеможливило проведення термічної обробки (укрупнення зерна та заниження механічних властивостей). В [5] було визначено оптимальний режим гартування сталі 4X4H5M4Ф2 (1095 ± 5 °С), що дозволило підвищити теплостійкість сталі до температури 650 °С. Визначено, що питома електрична провідність дослідженої сталі відповідає мінімальному значенню $0,075$ Ом·мм²/м (рис. 1а, штрихова лінія) при твердості 56 HRC (рис. 1а, суцільна лінія). Максимальне значення питомої електричної провідності ($0,138$ Ом·мм²/м) дослідженої сталі відповідає температурі гартування 1060 ± 5 °С (рис. 1а). Встановлено, що за температури гартування ливої сталі 1060 ± 5 °С та відпуску 600 ± 5 °С механічні властивості є занижені (зниження твердості на 5 HRC та порогу міцності на 250 МПа), порівнюючи за температури гартування 1095 ± 5 °С (твердість 49,5 HRC та поріг міцності 1580 МПа). Отже, підвищення механічних властивостей термічно-зміцненої сталі залежить від мінімального значення питомої електричної провідності (підвищення провідності). Як показують дослідження в широкому інтервалі температур гартування ($1080-1120$ °С), мінімальне значення питомої електричної провідності ($0,0415$ Ом·мм²/м) відповідає при температурі відпуску 595 °С (рис. 1б) та співпадає з оптимальним режимом остаточної термічної обробки сталі. Таким чином було прийняте рішення проводити гартування ливої та кованої сталі 4X4H5M4Ф2 за температури 1095 ± 5 °С [5-8], твердість якої співпадає на

рівні 56 HRC (рис.2), бал зерна №4 та №7 за ГОСТ 5639-65 (в литому та кованому стані, відповідно) (рис.3). Теплостійкість сталі було підвищено до 650 °С в литому стані [6] та кованому 630 °С [7] при 40 HRC (за кімнатної температури). Підвищення температури гартування сталі дало змогу більше розчинити карбідну фазу в процесі аустенізації, на основі якого є хром. Оскільки такий карбід виділяється при відпуску, коагулює та знижує теплостійкість сталі. Температурний інтервал гартування сталі в інтервалі $1050-1070$ °С показує підвищення твердості кованої сталі до 2 HRC, а вище 1070 °С до 1 HRC (рис.2). За таких температур гартування сталі співпадає зміна фізичного параметру - питомої електричної провідності. Для температури $1050-1070$ °С показує підвищення питомої електричної провідності ливої сталі (рис. 2).

Таким чином, після гартування більшу провідність має кована сталь, ніж лита. В інтервалі температур гартування сталі $1050-1110$ °С в литому стані максимальне значення питомої електричної провідності досягає $0,115$ Ом·мм²/м (1070 °С), а кованої $0,085$ Ом·мм²/м (1110 °С) (рис.2).

Такий методичний підхід після гартування сталі дозволяє проводити контроль температурного режиму при нагріві штампового інструменту.

Показано, що після термо-деформаційної обробки (кування) гартованої сталі зменшується розмір зерна (підвищено у два рази бал зерна від №8 до №7, ГОСТ 5639-65) (рис. 3). Це сприяло підвищенню ударної в'язкості сталі (у 5 разів) при відпуску у порівнянні з литим станом (рис. 4).

На одержаній кривій залежності ударної в'язкості від температури відпуску при охолодженні на повітрі ливої та кованої сталі спостерігається аномальне зниження її величини за температури 475 °С (рис. 4). У певному температурному інтервалі спостерігається кореляція між залежностями ударної в'язкості та питомої електричної провідності. Так, за температури відпуску до 475 °С відбувається інтенсивне збільшення та максимум величини питомої електричної провідності (особливо в кованому стані) та зниження до мінімуму величини ударної в'язкості (в литому та кованому стані) (рис. 4). Такий методичний підхід при визначенні питомої електричної провідності для встановлення відпускнуї крихкості сталі дозволяє замінити потужне устаткування при визначенні ударної в'язкості. Початок зниження величини ударної в'язкості дослідженої ливої та кованої сталі відбувається за температури 450 °С при підвищенні міцності та твердості та зміні структурно-чутливої величини (зменшення провідності) (рис. 4).

Встановлено, що застосування оптимізованих режимів гартування та відпуску (1095 °С, 590 °С, відповідно) дослідженої сталі підвищує ударну в'язкість до 30 Дж/см² в інтервалі температур ($460-490$ °С) відпускнуї крихкості [6], де спостерігається збільшення провідності сталі (рис. 5). Підвищення механічної характеристики (ударна в'язкість) сталі 4X4H5M4Ф2 дає можливість при ударних циклічних навантаженнях підвищити ресурс експлуатації пресового інструменту (матриці-фільєри) для гарячого пресування алюмінієвого сплаву (наприклад АК7ч) в інтервалі температур відпускнуї крихкості $450-500$ °С.

Підвищення твердості та міцності ливої сталі при відпуску за температур від 450 до 500 °С забезпечується завдяки виділенню карбідної складової на границях зерен,

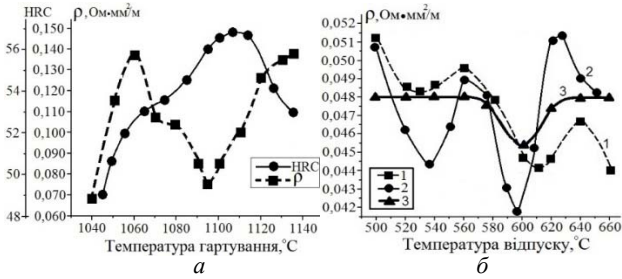


Рис. 1 – Залежність фізико-механічних властивостей (за кімнатної температури) від режимів термічної обробки литої сталі 4Х4Н5М4Ф2. а – твердості (HRC) та питомої електричної провідності від температури гартування, б – питомої електричної провідності від температури гартування (1-1085±5°C, 2-1100±5°C, 3-1115±5°C) та відпуску

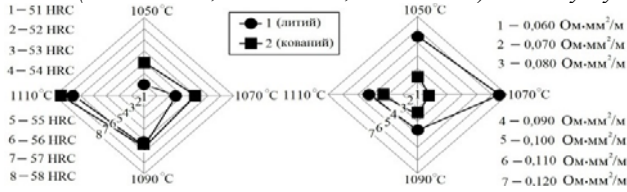


Рис. 2 – Залежність параметрів (твердість та питома електрична провідність) від температури гартування литої та кованої сталі 4Х4Н5М4Ф2

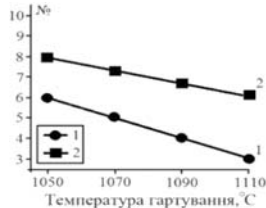


Рис. 3 – Залежність балу зерна аустеніту від температури гартування сталі 4Х4Н5М4Ф2 (1-литий, 2-кований)

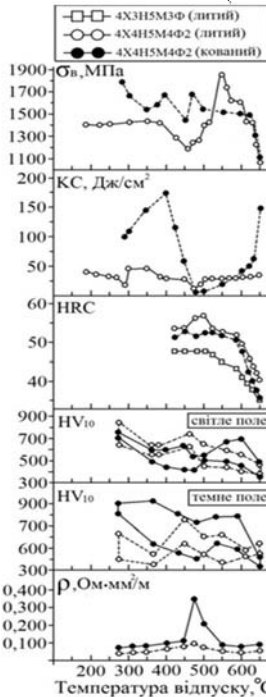


Рис. 4 – Залежність фізико-механічних властивостей від температури відпуску литої та кованої сталі 4Х4Н5М4Ф2: поріг міцності (МПа), ударна в'язкість (Дж/см²), твердість (HRC), мікротвердість у структурі металу (HV₁₀) та питома електрична провідність (Ом·мм²/м)

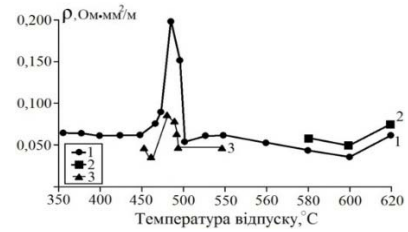


Рис. 5 – Залежність питомої електричної провідності (за кімнатної температури) від режимів температури відпуску литої сталі 4Х4Н5М4Ф2 (гартованої 1100±5 °С).

1 - відпуск (охолодження на повітрі), 2 - відпуск (охолодження в печі), 3 - відпуск за температури 590±5 °С (охолодження на повітрі) з наступним нагрівом в інтервалі температур (450–500 °С)

де спостерігається інтенсивне підвищення мікротвердості та твердості (рис. 4), порівняно з кованою сталлю такі показники властивостей є набагато нижчими. Підвищення мікротвердості дослідженої сталі 4Х4Н5М4Ф2 зумовлює підвищення її зносостійкості та ресурсу експлуатації пресового інструменту, проте сприяє підвищенню крихкості сталі і тим самим унеможливило проводити циклічні ударні навантаження при експлуатації інструменту. Отже, лита сталь має більшу перевагу при високій зносостійкості інструменту, ніж кована при гарячому пластичному деформуванню алюмінієвого сплаву за температур експлуатації 450-500 °С.

Штамповий інструмент при гарячому деформуванні міді або латуні проводиться за температури експлуатації 600 °С і вище. Результати досліджень (рис. 4) показують, що при зміні хімічного складу дослідної сталі (4Х4Н5М4Ф2) та підвищення її температури гартування на 70 °С (1095±5 °С), вдалось підвищити теплостійкість на 35 °С при 650 °С (40 HRC) в литому стані та на 15 °С при 630 °С (40 HRC) в кованому.

Висновки

Таким чином, сталь з РАПЕ (марки 4Х4Н5М4Ф2), яка була рекомендована працювати за високих температур експлуатації (900-950 °С) гарячого деформування мідно-нікелевого сплаву марки МНЖ 5-1, здатна працювати і при температурах нижче критичної точки А₁ (Т_{А1}=700 °С), а саме до температури 630 °С в кованому та 650 °С в литому стані для гарячого деформування міді та латуні.

Список літератури

1. Гогаєв К.О., Сидорчук О.М., Радченко О.К., Мамонова А.А. Штампова сталь для гарячого деформування з регульованим аустенітним перетворенням. *МОН*. 2014. 1. С. 40-44.
2. Гогаєв К. О., Радченко О. К., Сидорчук О. М., Лук'янець В. В. Технологія виготовлення штампової сталі 40Х3Н5М3Ф для гарячого деформування. Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин. *Зб. наук. статей за результатами, отриманими в 2013–2015 рр. Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАНУ*. 2015. 669-672.
3. Гогаєв К.О., Сидорчук О.М., Радченко О.К. Інструментальні штампові сталі для гарячого деформування (огляд). *Металознавство та обробка металів*. 2016. № 3. С. 18–24.
4. Гогаєв К.О., Сидорчук О.М., Радченко О.К., Карпець М.В., Пятачук С.Г. Структура та властивості загартованої сталі 40Х3Н5М3Ф, одержаної електрошлаковим перетопленням за високих температур. *Металознавство та новітні технології*. 2015. Т. 37. 12. С. 1653–1661.
5. Сидорчук О.М., Миронюк Д.В., Радченко О.К., Гогаєв К.О., Хонгуанг Є. Підвищення теплостійкості та властивостей

- штампової сталі з регулюванням аустенітного перетворення при експлуатації. *МОН*. 2019. 2. 19–25. doi:10.15407/mom2019.02.019
6. Сидорчук О.М., Гогаєв К.О., Радченко О.К., Миронюк Л.А., Миронюк Д.В. Термічна обробка штампової сталі підвищеної стійкості. *МОН*. 2020. 2. 29–37. doi:10.15407/mom2020.02.029
 7. Сидорчук О.М., Миронюк Л.А., Миронюк Д.В., Гогаєв К.О., Радченко О.К. Штампова кована сталь 4X4H5M4Ф2 підвищеної стійкості. *МОН*. 2020. 4. 30–38. doi:10.15407/mom2020.04.030
 8. Гогаєв К.О., Радченко О.К., Сидорчук О.М., Миронюк Д.В. Штампова сталь: пат. 141447 Україна: МПК C22C38/00. № u2019 09670; заявл. 05.09.2019; опубл. 10.04.2020. Бюл. № 7. 2020. 2 с.

References (transliterated)

1. Gogaev K.A., Sydorчук O.M., Radchenko O.K., Mamonova A.A. Shtampova stal dlya garyachogo deformuvannya [Stamped steel for hot deformation with adjustable austenitic transformation], *Metalozn. obrobka met [Metallurgy and metal processing]*, 2014, 1, 40–44.
2. Gogaev K.A., Radchenko O.K., Sydorчук O.M., Lukianchuk V.V. Tekhnolohiia vyhotovlennia shtampovoi stali 40Kh3N5M3F dlia hariachoho deformuvannya. Problemy resursu i bezpeky ekspluatatsii konstruktzii, sporud ta mashyn [Technology of production of stamped steel 40X3H5M3Ф for hot deformation. Problems of resource and safety of operation of structures, constructions and machines]. *Instytut elektrozvarivannia im. YE. O. Patona NAN Ukrainy*, 2015, 669–672.
3. Gogaev K. A., Sydorчук O. M., Radchenko O. K. Instrumentalni shtampovi stali (oglyad) [Tool die steels for hot

- deformation (review)]. *Metalozn. obrobka met [Metallurgy and metal processing]*, 2016, 3, 18–24.
4. Gogaev K. O., Sydorчук O. M., Radchenko O. K., Karpets M. V., Piatachuk, S. H. Struktura ta vlastuvosti zagartovanoi stali 40Kh3N5M3F, oderjanoi elektroshtakovym peretoplenniam za vysokoyh temperature [Structure and properties of hardened steel 40X3H5M3Ф, obtained by electroslag remelting at high temperatures]. *Metalofizyka ta novini tehnologii [Metal physics and the latest technologies]*, 2015, 12 (37), 1653–1661.
 5. Sydorчук O.M., Myroniuk D.V., Radchenko O.K., Gogaev K.A., Hongguang Ye. Pidvyshennya teplostiikosti ta vlastyvostei shtampovoi stali z reguluvanniam austenitnogo peretvorennya pry ekspluatatsii [Improving heat resistance and properties of stamped steel with adjustment of austenitic transformation during operation]. *Metalozn. obrobka met [Metallurgy and metal processing]*, 2019, 2, 19–25. doi: 10.15407/mom2019.02.019.
 6. Sydorчук O.M., Gogaev K.A., Radchenko O.K., Myroniuk L.A., Myroniuk D.V. Termichna obrobka shtampovoi stali pidvyshenoї stiikosti [Heat treatment of stamped steel of the increased stability]. *Metalozn. obrobka met [Metallurgy and metal processing]*, 2020, 2, 29–37. doi: 10.15407/mom2020.02.029.
 7. Sydorчук O.M., Myroniuk L.A., Myroniuk D.V., Gogaev K.A., Radchenko O.K. Shtampova kovana stal 4Kh4N5M4F2 pidvyshenoї stiikosti [Stamped forged steel 4X4H5M4Ф2 of the increased stability]. *Metalozn. obrobka met [Metallurgy and metal processing]*, 2020, 4, 3–11. doi: 10.15407/mom2020.04.030.
 8. Gogaev K. A., Radchenko O. K., Sydorчук O. M., Myroniuk D.V. Shtampova stal. Patent No.141447 Ukraine. MПК C22C38/00., u201909670; app. 05.09.2019; publ. 10.04.2020.

Відомості про автора (About author)

Сидорчук Олег Миколайович – кандидат технічних наук, старший дослідник, ПІМ ім. І.М. Францевича НАНУ, старший науковий співробітник відділу №10, м.Київ, Україна, ORCID:0000-0003-0026-7525; e-mail: sedoroleg@ukr.net.

Oleh Sydorчук – Ph.D, senior researcher, Frantsevich Institute for Problems in Materials Science of the National Academy of Sciences of Ukraine, senior researcher of the department No.10, Kyiv, Ukraine, ORCID: 0000-0003-0026-7525; e-mail: sedoroleg@ukr.net.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Сидорчук О. М. Вплив термічної обробки на штампову сталь 4X4H5M4Ф2 та встановлення її фізико механічних властивостей. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2021. № 1 (7). С. 34–38. doi:10.20998/2413-4295.2021.01.05.

Please cite this article as:

Sydorчук O. M. Influence of heat treatment on die steel 4Kh4N5M4F2 and establishment of its physico-mechanical properties. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2021, no. 1 (7). pp. 34–38. doi:10.20998/2413-4295.2021.01.05.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Сидорчук О. Н. Влияние термической обработки на штамповую сталь 4 X4H5M4Ф2 и установления ее физико-механических свойств. *Вестник Национального технического университета «ХПИ»*. Серія: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». 2021. № 1 (7). С. 34–38. doi:10.20998/2413-4295.2021.01.05.

АННОТАЦІЯ Приведены результаты исследований после термической обработки (закали и отпуска) легированной конструкционной стали марки 4 X4H5M4Ф2 в литом и кованом состоянии. Рекомендуются проводить частичную перекристаллизацию (неполный отжиг) исследовательской стали (4X4H5M4Ф2) при температуре 750±20 °С. Предлагается проводить термо-деформационную обработку (ковка при температуре 1170±20 °С), что повысило в два раза балл зерна закаленной стали и повысило ударную вязкость в пять раз после отпуска. Установлен оптимальный температурный режим закали (1095±5 °С) литой и кованой стали, твердость которой совпадает на уровне 56 HRC. Показано балл зерна в литом и кованом состоянии (№ 3 – № 6 и № 6 – № 8, соответственно) исследованной стали в зависимости от температуры закали (1050–1110 °С). Установлена зависимость между твердостью и удельной электрической проводимостью стали после закали по сравнению с литым и кованым состоянием. После закали стали предложен методический подход, который позволяет проводить контроль температурного режима при нагреве штампового инструмента. Установлено, что после закали стали, наибольшую проводимость имеет кованая, чем литая сталь. Представленные физико-механические свойства (порог прочности, ударная вязкость, твердость, микротвердость в структуре металла и удельная электрическая проводимость) исследованной закаленной стали (литой и кованой) после отпуска. Установлено повышение твердости и прочности литой стали при отпуске при температурах от 450 до 500 °С, обеспечивается выделению карбидной составляющей, где наблюдается интенсивное повышение микротвердости. Установлено, отпускную хрупкость исследованной стали при температуре 475±15 °С. Показано аномальное снижение ударной вязкости (до 15 Дж/см²) и интенсивное повышение удельной электрической проводимости литой и кованой стали при отпускной хрупкости. Установлено повышение микротвердости исследованной стали, которое способствует повышению износостойкости и ресурса эксплуатации штампового инструмента.

Ключевые слова: штамповая сталь; состав; термическая обработка; термо-деформационная обработка; структура; физико-механические свойства

Надійшла (received) 22.02.2021

УДК 510.635:004.891(045)

doi:10.20998/2413-4295.2021.01.06

АНАЛІЗ ГНУЧКИХ МЕТОДОЛОГІЙ РОЗРОБКИ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ РЕАЛІЗАЦІЇ У КОМАНДНИХ ПРОЄКТАХ

А. І. ВАВІЛЕНКОВА

кафедра комп'ютеризованих систем управління ФККПІ, Національний авіаційний університет, Київ, УКРАЇНА
e-mail: vavilenkova@gmail.com

АНОТАЦІЯ У матеріалах статті проаналізовано основні моделі життєвого циклу програмного забезпечення, що лежать в основі гнучких методологій розробки програмного забезпечення для виявлення особливостей їх застосування при реалізації командних проєктів. Виявлено, що використання класичних моделей життєвого циклу, зокрема, каскадної, спіральної, інкрементної, V-подібної та ітеративної, не являється ефективним при реалізації всіх сучасних аспектів розробки програмного забезпечення на основі використання нових інформаційних технологій. Проведено порівняльний аналіз найбільш популярних гнучких методологій розробки програмного забезпечення Agile, Scrum, Kanban, RUP, DSDM, RAD за такими показниками, як модель життєвого циклу, кількість ітерацій, мета створення проєкту та типи проєктів для реалізації, пріоритети, можливість взаємодії із замовником, адаптація до змін. Виявлені переваги та недоліки гнучких методологій розробки програмного забезпечення дали змогу виокремити методологію MSF, що базується на узгодженні каскадної, спіральної та ітеративної моделей життєвого циклу розробки програмного забезпечення та дає змогу обрати шаблон Scrum, як найбільш вдалий для реалізації та демонстрації роботи у навчальних командних проєктах. MSF використовує у роботі підхід, що передбачає поетапне створення робочого продукту з певною функціональністю, яка відображає вимоги до кінцевого продукту на даному етапі. Запропоновано використовувати рішення компанії Microsoft на основі Visual Studio та Team Foundation Server для централізованого керування елементами командного проєкту, використання інструментів візуального моделювання архітектури, можливості управління якістю коду та отримання всіма учасниками команди актуальної інформації про стан проєкту. Це відбувається завдяки тому, що модель MSF об'єднує у собі п'ять основних моделей: модель команди; модель процесу (послідовність дій, яка необхідна для побудови командного проєкту); дисципліну управління проєктами (передбачає комплексне планування всіх етапів командного проєкту, управління бюджетом, ресурсами, витратами, підготовки графіків); дисципліни управління ризиками та дисципліни управління готовністю (оцінювання знань членів командного проєкту для подальшого розподілу ролей у команді). Продемонстровано приклад створення навчального командного проєкту на основі використання шаблону гнучкої методології Scrum у середовищі Visual Studio на базі Team Foundation Server.

Ключові слова: гнучка методологія; командний проєкт; життєвий цикл; програмне забезпечення; аналіз; Scrum-команда; Visual Studio

ANALYSIS OF FLEXIBLE METHODOLOGIES OF SOFTWARE DEVELOPMENT FOR IMPLEMENTATION IN TEAM PROJECTS

A. VAVILENKOVA

Department of Computerized Control Systems, National Aviation University, Kyiv, UKRAINE

ABSTRACT The materials of the article analyze the main models of the software life cycle, which underlie the flexible methodologies of software development to identify the features of its application during the implementation of team projects. It was found that the use of classical life cycle models, in particular, cascade, spiral, incremental, V-shaped and iterative, is not effective in implementing all modern aspects of software development based on the use of new information technologies. It was conducted the comparative analysis of the most popular flexible methodologies of software development Agile, Scrum, Kanban, RUP, DSDM, RAD on such indicators as life cycle model, number of iterations, purpose of project creation and types of projects for implementation, priorities, possibility of interaction with the customer, adaptation to change. The advantages and disadvantages of flexible software development methodologies made it possible to single out the MSF methodology, which is based on the harmonization of cascading, spiral and iterative models of the software development lifecycle and allows you to choose the Scrum template as the most successful for implementing and demonstrating work in team development projects. MSF uses an approach that involves the gradual creation of a working product with some functionality that reflects the requirements for the final product at this stage. It is proposed to use Microsoft solutions based on Visual Studio and Team Foundation Server for centralized management of team project elements, use of visual architecture modeling tools, code quality management capabilities and obtaining all project team members up-to-date information on project status. This is because the MSF model combines five following main models: team model; process model (sequence of actions required to build a team project); discipline of project management (provides comprehensive planning of all stages of the team project, budget management, resources, costs, scheduling); risk management disciplines and readiness management disciplines (assessment of team project members' knowledge for further distribution of team roles). The article demonstrates an example of creating a training team project based on the use of the Scrum flexible methodology template in Visual Studio based on Team Foundation Server.

Keywords: flexible methodology; team project; life cycle; software; analysis; Scrum-command; Visual Studio

Вступ

На сьогоднішній день малі чи великі підприємства, які створюються у нашій країні та за її

межами, починають свою роботу з поступової реалізації проєкту, розробленого ще до початку їх функціонування. Це передбачає виконання деякої

послідовності дій, тобто роботу згідно з завчасно розробленим алгоритмом для досягнення певної мети, працюючи у команді. Якщо ще декілька років тому сучасні компанії використовували для планування всього життєвого циклу своєї діяльності програмний продукт MS Project [1], то сьогодні автоматизація роботи командних проєктів відбувається завдяки різноманітним програмним продуктам, реалізованим на основі гнучких методологій розробки [2]. Гнучкі методології представляють собою системи, що визначають порядок виконання задач, методи оцінювання та контролювання, орієнтовані на використання ітеративного підходу для реалізації певного набору вимог [3,4].

Різноманіття концепцій та велика кількість різних додатків для реалізації командних проєктів, зокрема для розробки програмного забезпечення, викликає сумбур у загальному розумінні концепцій, моделей та алгоритмів функціонування команд розробників. Тому актуальною задачею досі залишається вибір методологій для своєчасного отримання якісних продуктів розробки.

Мета роботи

Аналіз програмних продуктів, що запропоновані сьогодні на ринку інформаційних технологій, показав, що всі програмні середовища для реалізації командних проєктів реалізують типові для розробки програмного забезпечення етапи життєвого циклу, виходячи з спрямованості проєкту, його бюджету та строків реалізації, при цьому по-різному забезпечуючи взаємозв'язки всередині циклу розробки продукту. Стикнувшись з проблемою широкого вибору програмного забезпечення для реалізації командних проєктів та відсутністю чіткої регламентації дій щодо створення навчальних проєктів, виникла необхідність у розробці чіткого алгоритму дій. Тому метою даної статті є аналіз моделей життєвого циклу розробки програмних продуктів, що у свою чергу лежать в основі гнучких методологій розробки програмного забезпечення для виявлення особливостей їх застосування при реалізації командних проєктів.

Виклад основного матеріалу

Перш ніж застосовувати програмну реалізацію командного проєкту, необхідно розібратися з метою його створення, моделлю та алгоритмом функціонування, адже тільки ретельне планування кожного з кроків дасть змогу отримати якісний результат.

Метою реалізації командного проєкту в області інформаційних технологій являється створення якісного програмного продукту в чітко визначені терміни. Для цього важливо правильно обрати модель життєвого циклу розробки програмного забезпечення, тобто структуру, що міститиме процеси дій та

завдання, які вирішуватимуться в ході розробки, використання та супроводження програмного продукту.

Виділяють такі основні моделі життєвого циклу розробки програмного забезпечення.

Каскадна модель – передбачає лінійну послідовність виконання етапів, у ній кожен етап розробки, що відповідає певній стадії життєвого циклу програмного забезпечення, продовжує попередній [5-7]. Тобто для того, щоб перейти на наступний етап, потрібно повністю завершити попередній, проєкт реалізується за наступними кроками: визначення вимог, аналіз, проєктування програмного забезпечення, розробка, тестування та впровадження (рис. 1).

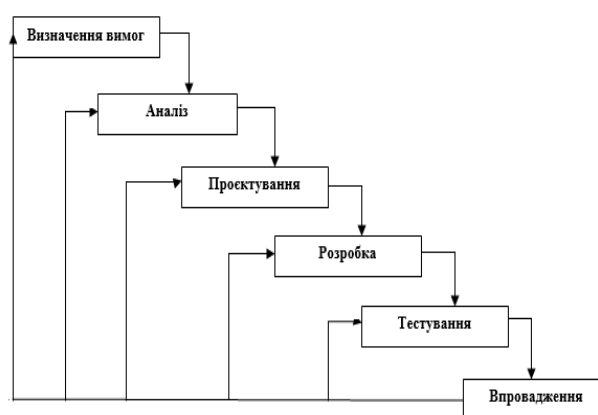


Рис. 1 – Етапи каскадної моделі життєвого циклу розробки програмного забезпечення

Каскадна модель застосовується, коли ще до початку розробки можна досить точно та повно сформулювати всі вимоги до проєкту. Така модель підходить для великих та складних проєктів, які передбачають повний контроль ризиків та які плануються переносити з однієї платформи на іншу.

Спіральна модель – розробка програмного забезпечення у вигляді послідовності версій, всі етапи життєвого циклу проходять витками [5-6,8], на кожному з яких відбувається визначення вимог, аналіз, проєктування програмного забезпечення, розробка, тестування та впровадження (рис. 2). В результаті на кожному витку спіралі створюється чергова версія продукту, конкретизуються вимоги проєкту, визначається якість та плануються роботи наступного витка.

Спіральна модель дозволяє швидше показати замовнику робочий продукт, допускає зміну вимог при розробці, забезпечує гнучкість, помилки та слабкі місця виявляються та виправляються на кожній ітерації. Така модель характерна для розробки не типового, принципово нового програмного забезпечення, коли на початку розробки немає однозначного, чіткого бачення кінцевого продукту.

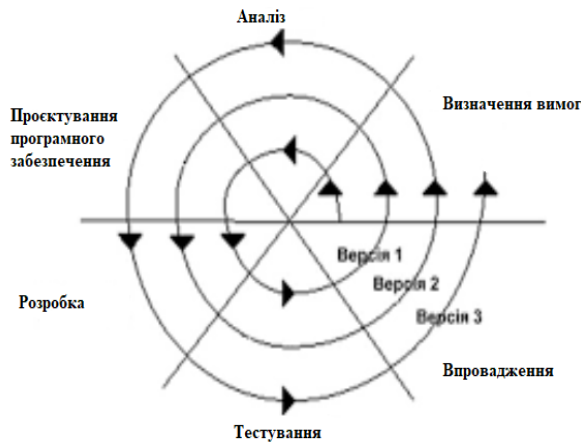


Рис. 2 – Графічна інтерпретація спіральної моделі життєвого циклу розробки програмного забезпечення

Інкрементна модель – передбачає розробку програмного продукту з лінійною послідовністю стадій, проте в декілька інкрементів (версій) із запланованим покращенням продукту протягом всього життєвого циклу, дає змогу розширювати можливості, добудову модулів та реалізацію додаткових функцій [9-10]. Поки одна версія експлуатується, наступна, враховуючи недоліки попередньої, тільки планується або розробляється.

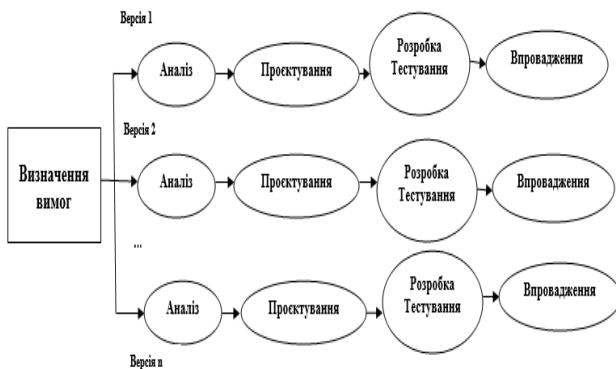


Рис. 3 – Концепція інкрементної моделі життєвого циклу розробки програмного забезпечення

За інкрементною моделлю розробляються проекти, у яких точно технічне завдання прописане уже на початку, а програмний продукт потрібно створити швидко та регулярно отримувати зворотний зв'язок від користувача.

V-подібна модель – це модель, у якій замовник одночасно з командою програмістів складають вимоги до системи та описують, як будуть її тестувати на етапах аналізу, проектування програмного забезпечення, розробки та впровадження.

Горизонтальні лінії між завданнями розробки та завданнями тестування показують, як результати

кожної з фаз розробки впливають на розвиток системи тестування на кожній з фаз тестування [5-6,11].

V-подібна модель застосовується при розробці проектів, у яких важлива надійність, а ціна помилки дуже висока, тому кількість помилок в архітектурі зводиться до мінімуму (рис. 4).

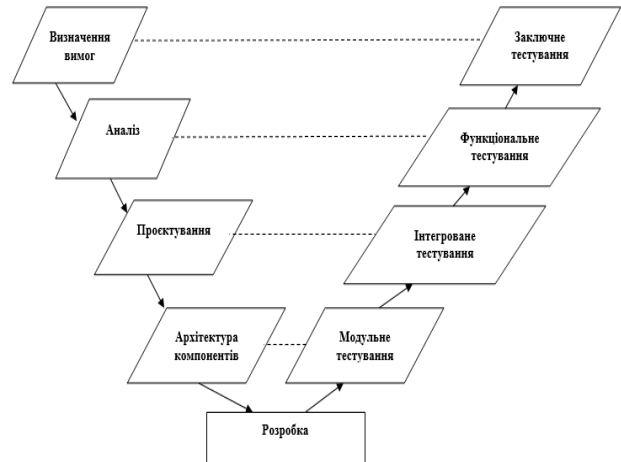


Рис. 4 – V-подібна модель життєвого циклу розробки програмного забезпечення

Ітеративна модель – передбачає розбиття проекту на частини (ітерації) та проходження етапів життєвого циклу на кожному з них. Кожен етап являється закінченим сам по собі, а сукупність етапів формує кінцевий результат [5-6,12].

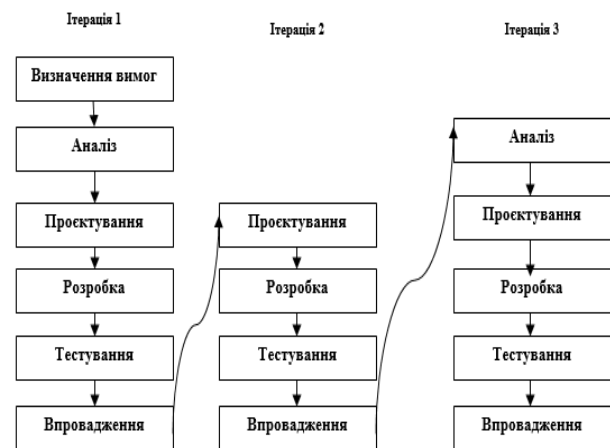


Рис. 5 – Графічна інтерпретація ітеративної моделі життєвого циклу розробки програмного забезпечення

Ітеративна модель застосовується для великих проектів з невизначеними вимогами або для задач з інноваційним підходом.

Алгоритм функціонування командного проекту, тобто концепція, за якою буде працювати команда залежить від обраної гнучкої методології, яких у наш час на ринку ІТ-технологій досить багато.

Проведемо порівняльну характеристику найпопулярніших гнучких методологій, за якими розробляються та функціонують командні проекти (табл. 1, табл.2) [2,13-16].

Із порівняльної характеристики розглянутих шести гнучких методологій розробки програмного забезпечення видно, що всі вони налаштовані на отримання кінцевого продукту з мінімальними ризиками, високою швидкістю розробки, простотою розуміння для замовника та можливістю взаємодії з ним. Методології відрізняються моделями життєвого циклу розробки програмного забезпечення, а відповідно кількістю ітерацій, на які розбивається процес розробки, та послідовністю їх виконання.

Таблиця 1 – Порівняльна характеристика гнучких методологій Agile, Scrum та RUP

| Параметр | Agile | Scrum | RUP |
|---|---|--|------------|
| Модель ЖЦ | Ітеративна Спіральна Інкремент. | Ітеративна Спіральна Інкремент. | Ітеративна |
| Візуалізація ЖЦ | + | + | + |
| Типи проєктів | Великі з можливістю внесення змін | Навчальні та середні з можливістю внесення змін | Великі |
| Наявність ітерацій | Спринт | Спринт | Етап |
| Мета – робочий продукт | + | + | + |
| Щоденні спринти | + | + | - |
| Люди та взаємодія на першому місці | + | + | +/- |
| Процеси та інструменти на першому місці | - | - | +/- |
| Можливість взаємодії з замовником | + | + | + |
| Готовність до змін | + | + | + |
| Простота | + | + | +/- |
| Адаптація до змін | + | + | + |
| Швидкість розробки | + | + | + |
| Мінімізація ризиків | + | + | + |
| Кількість основних етапів | 6 | 6 | 4 |

Таблиця 2 – Порівняльна характеристика гнучких методологій Kanban, DSDM та RAD

| Параметр | Kanban | DSDM | RAD |
|---|---|--------------------------------|-----------|
| Модель ЖЦ | Ітеративна Спіральна Інкремент. | Ітеративна Інкремент- на | Спіральна |
| Візуалізація ЖЦ | + | - | - |
| Наявність ітерацій | Спринт | Стадія | Фаза |
| Типи проєктів | Великі з можливістю внесення змін | Невеликі | Невеликі |
| Мета – робочий продукт | + | + | + |
| Щоденні спринти | + | - | - |
| Люди та взаємодія на першому місці | + | +/- | +/- |
| Простота | + | +/- | +/- |
| Процеси та інструменти на першому місці | - | +/- | +/- |
| Можливість взаємодії з замовником | + | + | + |
| Готовність до змін | + | + | + |
| Простота | + | + | + |
| Адаптація до змін | + | + | + |
| Швидкість розробки | + | + | + |
| Мінімізація ризиків | + | + | + |
| Кількість основних етапів | 6 | 3 (4) | 4 |

Методологія, розроблена компанією Microsoft, MSF (Microsoft Solutions Framework) базується на узгодженні каскадної, спіральної та ітеративної моделей життєвого циклу розробки програмного забезпечення. MSF використовує у роботі підхід, що передбачає поетапне створення робочого продукту з певною функціональністю, яка відображає вимоги до кінцевого продукту на даному етапі [17]. Реалізація п'яти фаз, тобто послідовного розв'язання задач, та віх, що служать точками переходу від однієї фази до іншої (рис. 6), визначають зміни в поточних задачах рольових кластерів проєктної команди [18].

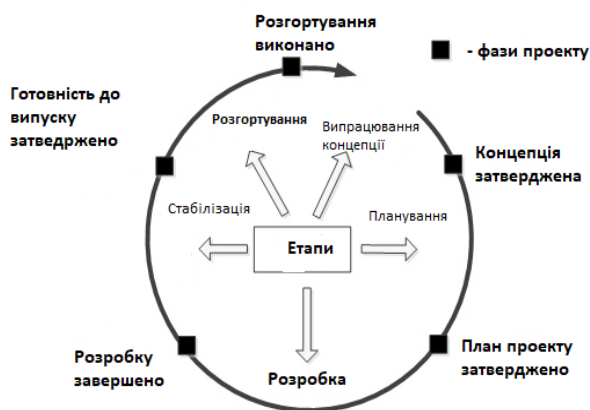


Рис. 6 – Візуалізація процесів методології Microsoft Solutions Framework

Також методологія MSF дозволяє реалізувати концепції роботи Agile, Scrum та CMMI (рис. 7).

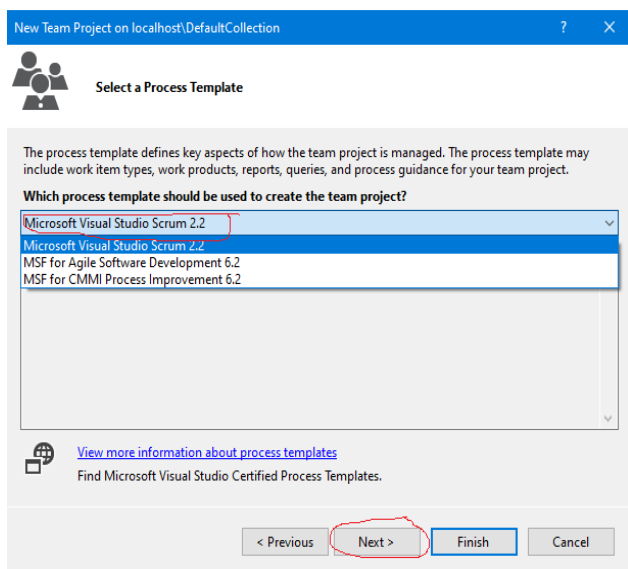


Рис. 7 – Шаблони реалізації у MSF

Модель MSF об'єднує у собі п'ять основних моделей:

- модель команди – передбачає організацію команди за шести основними напрямками: управління продуктом, управління програмою, розробка, тестування, навчання користувачів, супровід; у рамках шаблону Scrum-команди виділяють три основні ролі для реалізації цих шести напрямків – це Product Owner, Scrum Master та Scrum Team;

- модель процесу – тобто послідовність дій, яка необхідна для побудови командного проекту, представляє собою проходження таких фаз: фаза аналізу, на якій формується представлення про програмний продукт на даному витку спіралі, та, як результат, – віха - затверджене уявлення про проект; фаза планування – відбувається прогнозування ризиків, оцінка графіка робіт та необхідних ресурсів, результат – віха – затверджений план проекту; фаза розробки – визначає проміжні етапи випуску

продукту, кожен із яких включає повний цикл тестування, відлагодження та внесення змін, результат – віха – завершення розробки; фаза стабілізації – перевірка функціональності в реальних умовах та повномасштабне тестування, віха – реліз продукту; фаза розгортання – впровадження на місцях завершується, впроваджене рішення стабілізоване, віха – впровадження завершено;

- дисципліна управління проектами – передбачає комплексне планування всіх етапів командного проекту, управління бюджетом, ресурсами, витратами, підготовка графіків;

- дисципліна управління ризиками – процес відслідковування та мінімізації ризиків, який обов'язково включає: визначення ризиків, їх аналіз та розстановку пріоритетів, план та графік уникнення, відслідковування ризиків та звітність, їх контроль та знання.

- управління готовністю – передбачає оцінювання знань членів командного проекту для подальшого розподілу ролей у команді.

Обговорення результатів

Для реалізації концепції управління командним проектом на всіх етапах його життя компанія Microsoft пропонує рішення на основі Visual Studio та Team Foundation Server (нова версія Azure DevOps) [18], що дає змогу централізовано керувати всіма елементами командного проекту, використовувати інструменти візуального моделювання архітектури, можливості управління якістю коду, а також надає всім учасникам команди можливість отримувати інформацію про стан проекту та спрощує комунікацію.

Так, після створення та налаштування параметрів командного проекту, який можна переглядати як через Team Explorer з Visual Studio, так і через Web-доступ, прописуються основні вимоги замовника, що формуються у список Product Backlog (рис. 8) з можливістю додавання в нього задач шляхом взаємодії з MS Excel та MS Project. Таким чином програмно реалізується стадія визначення вимог до командного проекту.

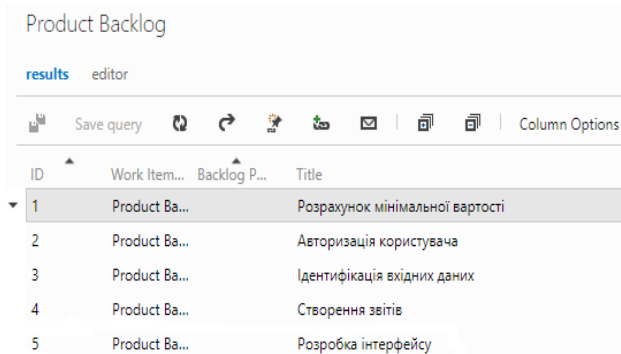


Рис. 8 – Product Backlog командного проекту

Візуальне моделювання архітектури командного проекту, тобто стадія проектування, реалізована у Visual Studio за допомогою побудови UML-діаграм, на яких деталізуються задачі проекту із Product Backlog, визначаються ролі, задаються зв'язки (рис. 9).

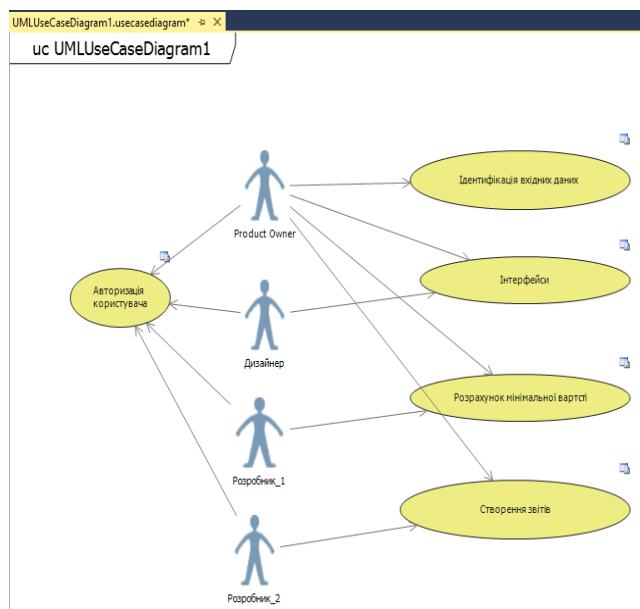


Рис. 9 – Візуальне моделювання структури проекту

Реалізація всього проекту розбивається на спринти (рис. 10), для кожного з яких задається свій набір задач та підзадач для виконання, що формуються у Sprint Backlog, де учасникам командного проекту призначаються певні задачі, а план виконання спринту можна простежити на спеціальній дошці Board (рис. 11).

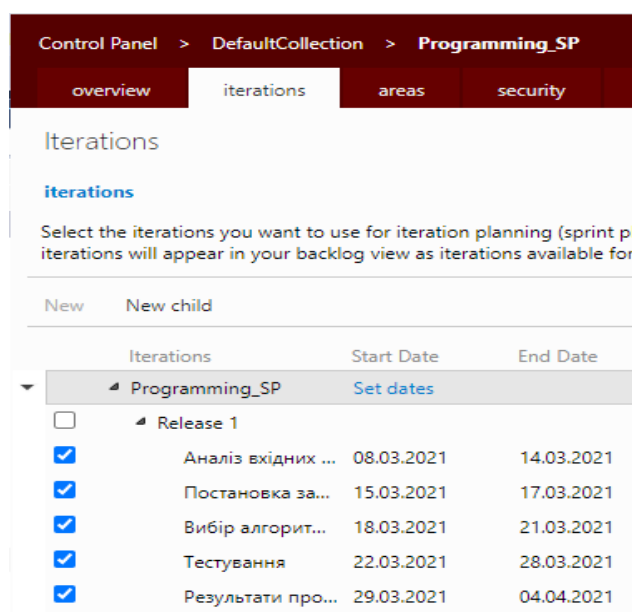


Рис. 10 – Спринти командного проекту

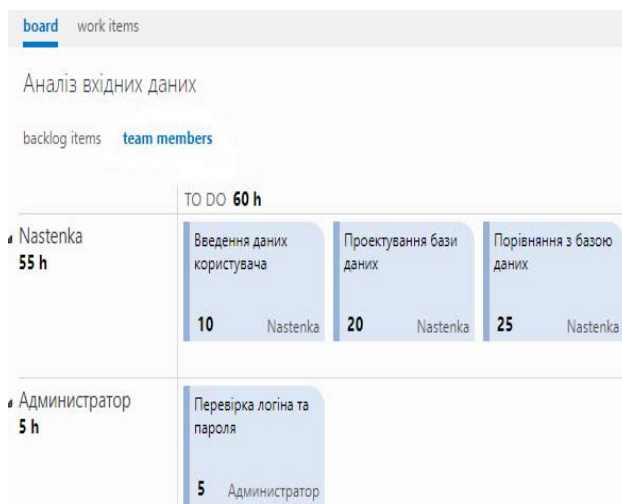


Рис. 11 – Інструмент Board для перегляду Sprint Backlog

В процесі роботи, тобто під час реалізації спринту, поставлені задачі поступово виконуються, тобто згоряють, що можна простежити на діаграмі згоряння, як для конкретного спринту, так і для проекту в цілому.

З продемонстрованих прикладів видно, що інструменти Visual Studio реалізують концепцію гнучкої методології Scrum, застосовуючи всі характерні їй поняття у роботі та дають змогу візуалізувати як архітектуру, так і стадії реалізації командного проекту.

Висновки

Основна мета використання гнучких методологій розробки програмного забезпечення – це створення командою прогнозованого процесу розробки програмного продукту необхідної якості [19]. Проведений порівняльний аналіз найбільш популярних гнучких методологій розробки програмного забезпечення Agile, Scrum, Kanban, RUP, DSDM, RAD за такими показниками, як модель життєвого циклу, кількість ітерацій, мета створення проекту та типи проектів для реалізації, пріоритети, можливість взаємодії із замовником, адаптація до змін, дав змогу виокремити методологію MSF, що базується на узгодженні каскадної, спіральної та ітеративної моделей життєвого циклу розробки програмного забезпечення та дає змогу обрати шаблон Scrum, як найбільш вдалий для реалізації та демонстрації роботи у навчальних командних проектах. На прикладах продемонстровано поетапне створення робочого продукту в програмному середовищі Visual Studio на базі Team Foundation Server. Це дає змогу оцінити зручність та можливість візуалізації результатів роботи командного проекту на кожній з його стадій виконання.

Список літератури

References (transliterated)

1. Lewis C., Chatfield C., Johnson T. *Microsoft Project 2019 step by step*. Pearson Education: Microsoft Press, 2019. 482 p.
2. Вольфсон Б. Л. *Гибкое управление проектами и продуктами*. СПб.: Питер Пресс, 2016. 600 с.
3. Мартин Р. К., Ньюкирк Дж. В., Косс Р. С. *Быстрая разработка программ. Принципы, примеры, практика*. М.: Вильямс, 2004. 752с.
4. Madachy R. J. *Software Process Dynamics*. Wiley-IEEE Press, 2008. 632 p.
5. Selby R. W. *Software Engineering: Barry W. Boehm's Lifetime Contributions to Software Development, Management, and Research*. Wiley-IEEE Computer Society Pr, 2007. 832 p.
6. Брауде Э. *Технология разработки программного обеспечения*. СПб.: Питер, 2004. 655 с.
7. Сидоров К. Модели разработки программного обеспечения. URL: <https://nortex.pro/blog/razrabotka-po-modeli-razrabotki-po> (дата звернення: 25.02.2021).
8. Матс И. Модели жизненного цикла программного обеспечения. URL: <https://habr.com/ru/post/111674/> (дата звернення: 03.03.2021).
9. Aleem S., Capretz L. F., Ahme F. Game development software engineering process life cycle: a systematic review. *J. Softw. Eng. Res. Dev.* 2016. Vol. 4. 6. doi:10.1186/s40411-016-0032-7.
10. Tahera, K., Wynn, D. C., Earl, C. et al. Testing in the incremental design and development of complex products. *Res. Eng. Design*. 2019. Vol. 30. P. 291–316. doi: 10.1007/s00163-018-0295-6.
11. Модели життєвого циклу, принципи і методології розробки програмного забезпечення (ПЗ). URL: <https://evergreens.com.ua/ua/articles/software-development-metodologies.html> (дата звернення: 11.03.2021).
12. SDLS Iterative Model. URL: https://www.tutorialspoint.com/sdlc/sdlc_iterative_model.htm (дата звернення: 11.03.2021).
13. Putri D., Rozilawati. R., Zulkefli M. Team Formation for Agile Software Development: A Review. *J. Adv. Science, Eng. Inf. Tech.*, 2020, Vol. 10, 2. P. 555-561. doi: 10.18517/ijaseit.10.2.10191.
14. Alaidaros H., Omar M, Romli R. An improved model of Agile Kanban method: verification process through experts' review. *International Journal of Agile Systems and Management*. 2020. Vol. 13. No. 4. P. 390-416. doi: 10.1504/IJASM.2020.112337.
15. Satherland D. Scrum. *The Art of Doing Twice the Work in Half the Time*. Random House, 2015. 256 p.
16. Kruchten P. *The Rational United Process: An Introduction*. Second Edition. М.: Viliams, 2002. 240 p.
17. Microsoft Solutions Framework. Basic Principles. URL: <https://newline.tech/microsoft-solutions-framework-basic-principles/> (дата звернення: 25.01.2021).
18. Giotis T. C. *How to deliver successful IT projects using MSF team model and MSF process model*. PMI® Global Congress 2007— EMEA, Budapest, Hungary. Newtown Square, PA: Project Management Institute. URL: <https://www.pmi.org/learning/library/deliver-project-microsoft-solutions-framework-7413> (дата звернення: 11.03.2021).
19. Вавіленкова А. І. *Комп'ютеризовані системи управління: навч. посіб. К.: НАУ, 2020. 140 с.*
1. Lewis C., Chatfield C., Johnson T. *Microsoft Project 2019 step by step*. Pearson Education: Microsoft Press, 2019. 482 p.
2. Volfson B. L. *Gibкое управление proectami i productami*. SpB., Piter Press, 2016. 600 p.
3. Martin R. K., Newkirk J. V., Koss R. S. *Bustraya razrabotka program*. M., Vilyams, 2004. 752 p.
4. Madachy R. J. *Software Process Dynamics*. Wiley-IEEE Press, 2008. 632 p.
5. Selby R. W. *Software Engineering: Barry W. Boehm's Lifetime Contributions to Software Development, Management, and Research*. Wiley-IEEE Computer Society Pr, 2007. 832 p.
6. Braude E. *Technologia razrabotki programmogo obespecheniya*. SpB., Piter, 2004. 655 p.
7. Sidorov K. *Modeli razrabotki programmogo obespecheniya*. Available at: <https://nortex.pro/blog/razrabotka-po-modeli-razrabotki-po> (accessed 25.02.2021).
8. Matzch I. *Modeli zhiznennogo tsikla programmogo obespecheniya*. Available at: <https://habr.com/ru/post/111674/> (accessed 03.03.2021).
9. Aleem S., Capretz L. F., Ahme F. Game development software engineering process life cycle: a systematic review. *J. Softw. Eng. Res. Dev.*, 2016, Vol. 4, 6, doi: 10.1186/s40411-016-0032-7.
10. Tahera, K., Wynn, D. C., Earl, C. et al. Testing in the incremental design and development of complex products. *Res. Eng. Design*, 2019, Vol. 30, pp. 291–316, doi: 10.1007/s00163-018-0295-6.
11. Modeli zhittevogo tsiklu, prinzicipi i metodologii rozrobku programmogo zabezpechennya (PZ). Available at: <https://evergreens.com.ua/ua/articles/software-development-metodologias.html> (accessed: 11.03.2021).
12. SDLS Iterative Model. Available at: https://www.tutorialspoint.com/sdlc/sdlc_iterative_model.htm (accessed: 11.03.2021).
13. Putri D., Rozilawati. R., Zulkefli M. Team Formation for Agile Software Development: A Review. *J. Adv. Science, Eng. Inf. Tech.*, 2020, Vol. 10, 2. pp. 555-561, doi: 10.18517/ijaseit.10.2.10191.
14. Alaidaros H., Omar M, Romli R. An improved model of Agile Kanban method: verification process through experts' review. *International Journal of Agile Systems and Management*, 2020, Vol. 13, 4, pp. 390-416, doi: 10.1504/IJASM.2020.112337.
15. Satherland D. Scrum. *The Art of Doing Twice the Work in Half the Time*. Random House, 2015. 256 p.
16. Kruchten P. *The Rational United Process: An Introduction*. Second Edition. М., Vilyams, 2002. 240 p.
17. Microsoft Solutions Framework. Basic Principles. Available at: <https://newline.tech/microsoft-solutions-framework-basic-principles/> (accessed: 25.01.2021).
18. Giotis T. C. *How to deliver successful IT projects using MSF team model and MSF process model*. PMI® Global Congress 2007— EMEA, Budapest, Hungary. Newtown Square, PA, Project Management Institute. Available at: <https://www.pmi.org/learning/library/deliver-project-microsoft-solutions-framework-7413> (accessed 11.03.2021).
19. Vavilenkova A. I. *Komputerizovani system upravlinnya*. K. NAU, 2020. 140 p.

Відомості про авторів (About authors)

Вавіленкова Анастасія Ігорівна – доктор технічних наук, доцент, Національний авіаційний університет, професор кафедри комп'ютеризованих систем управління ФККПІ; м. Київ, Україна; ORCID: 0000-0002-9630-4951; e-mail: vavilenkovaaa@gmail.com.

Anastasiia Vavilenkova – DSc, Docent, Professor, Department of Computerized Control Systems, Kyiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-9630-4951; e-mail: vavilenkovaaa@gmail.com.

Будь ласка, посилайтеся на цю статтю наступним чином:

Вавіленкова А. І. Аналіз гнучких методологій розробки програмного забезпечення для реалізації у командних проєктах. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: *Нові рішення в сучасних технологіях*. – Харків: НТУ «ХПІ». 2021. № 1 (7). С. 39-46. doi:10.20998/2413-4295.2021.01.06.

Please cite this article as:

Vavilenkova A. Analysis of flexible methodologies of software development for implementation in team projects. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2021, no. 1 (7), pp. 39-46, doi:10.20998/2413-4295.2021.01.06.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Вавіленкова А. И. Анализ гибких методологий разработки программного обеспечения для реализации в командных проєктах. *Вестник Национального технического университета «ХПИ»*. Серія: *Новые решения в современных технологиях*. – Харьков: НТУ «ХПИ». 2021. № 1 (7). С. 39-46. doi:10.20998/2413-4295.2021.01.06.

АННОТАЦИЯ В материалах статьи проведен анализ основных моделей жизненного цикла программного обеспечения, которые лежат в основе гибких методологий разработки программного обеспечения для обнаружения особенностей их использования при реализации командных проєктов. Отмечено, что использование классических моделей жизненного цикла, в частности каскадной, спиральной, инкрементной, V-подобной и итеративной, не является эффективным во время реализации всех современных аспектов разработки программного обеспечения на основании использования новых информационных технологий. Проведен сравнительный анализ наиболее популярных гибких методологий разработки программного обеспечения Agile, Scrum, Kanban, RUP, DSDM, RAD за такими показателями, как модель жизненного цикла, количество итераций, цель создания проєкта и виды проєктов для реализации, приоритеты, возможность взаимодействия с заказчиком, адаптация к изменениям. Полученные преимущества и недостатки гибких методологий разработки программного обеспечения дали возможность выделить методологию MSF, которая построена на согласовании каскадной, спиральной и итерационной моделях жизненного цикла разработки программного обеспечения и дает возможность выбрать шаблон Scrum, как наиболее удачный для реализации и демонстрации работы в учебных командных проєктах. MSF использует в работе подход, который предполагает поэтапное создание рабочего продукта с определенной функциональностью, которая отображает требования к конечному продукту на данном этапе. Предложено использовать решение компании Microsoft на базе Visual Studio и Team Foundation Server для централизованного управления элементами командного проєкта, использования инструментов визуального моделирования архитектуры, возможности управления качеством кода и получения всеми участниками команды актуальной информации о состоянии проєкта. Это осуществляется благодаря тому, что модель MSF объединяет в себе пять основных моделей: модель команды; модель процесса (последовательность действий, которая необходима для построения командного проєкта), дисциплины управления проєктами (предполагает комплексное планирование всех этапов командного проєкта, управление бюджетом, ресурсами, затратами, подготовкой графиков), дисциплины управления рисками и дисциплины управления готовностью (оценивание знаний членов командного проєкта для дальнейшего распределения ролей в команде). Продемонстрирован пример создания программного проєкта на базе использования шаблона гибкой методологии Scrum в среде Visual Studio на основании Team Foundation Server.

Ключевые слова: гибкая методология; командный проєкт; жизненный цикл; программное обеспечение; анализ; Scrum-команда; Visual Studio

Надійшла (received) 26.02.2021

УДК 621.315

doi:10.20998/2413-4295.2021.01.07

УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ ТРИВИМІРНОЇ ВІЗУАЛІЗАЦІЇ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ МОРФОЛОГІЧНИХ ОЗНАК ФАЗОВИХ МІКРООБ'ЄКТІВ

Є. І. СОКОЛ, К. В. КОЛІСНИК, Т. В. БЕРНАДСЬКА*

кафедра промислової та біомедичної електроніки, НТУ «ХПІ», Харків, УКРАЇНА
*e-mail: tatyana.bernadska@gmail.com

АНОТАЦІЯ У роботі запропоновано використання методів фізичного та математичного тривимірного моделювання фазових мікрооб'єктів, зокрема еритроцитів крові, з метою визначення їх морфологічних змін. Докладно розглянуто методи цифрової обробки сигналів на основі подвійного перетворення Фур'є, з накладанням смугового фільтру, метод відновлення тривимірної форми об'єктів за двовимірними знімками та метод спектрального аналізу при обробці отриманих відеоданих. Для експериментального дослідження запропонованих методів була розроблена принципова оптична схема пристрою відображення цифрового зображення мікрооб'єктів з покращеними експлуатаційними характеристиками. На основі габаритного й абераційного розрахунків були обрані оптимальні за оптичними показниками елементи і зібрано експериментальний стенд. Були отримані інтерференційні цифрові знімки еритроцитів крові людини в нормі та змінених під дією осмотичного тиску, знімки клітин периферичної крові на просвітлення трьома видами когерентного випромінювання. Для реалізації тривимірного моделювання розроблено програму на мові Python із використанням бібліотек Numpy і Open CV та програма, що дозволяє будувати і візуалізувати тривимірні моделі по двовимірним знімкам, яка працює під управлінням ОС Windows, написана на мові C ++. Для виведення 3D моделей використовується бібліотека DirectX і графічний прискорювач. Запропонований метод візуалізації тривимірних моделей по двовимірним знімкам дає можливість змінювати масштаби поверхні і використаний тип проекції, працювати у реальному масштабі часу в інтерактивному режимі. Використання методу спектрального аналізу з обробкою зображень еритроцитів на просвітлення, отриманих у трьох частотних діапазонах когерентного світла, після подальшої кореляції отриманих результатів дозволив значно підвищити точність визначення його морфологічних параметрів. Загалом, запропоновані вдосконалені методи дозволяють використовувати їх для визначення стану плазматичних мембран еритроцитів крові з метою оцінки можливих патологій, що підвищить ефективність методів лабораторної діагностики.

Ключові слова: лабораторна діагностика; когерентне випромінювання; інтерференційне зображення еритроцитів; цифрова обробка; тривимірне зображення; спектральний аналіз

IMPROVEMENT OF THE THREE-DIMENSIONAL VISUALIZATION METHODS FOR DETERMINATION OF MORPHOLOGICAL FEATURES OF PHASE MICROOBJECTS

Y. SOKOL, K. KOLISNYK, T. BERNADSKA

Department of Industrial and Biomedical Electronics, NTU "KhPI", Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT The use of methods of physical and mathematical three-dimensional modelling of phase microobjects, in particular blood erythrocytes, was proposed in order to determine morphological changes. The method of digital signal processing based on double Fourier transform, with the imposition of a band pass filter, the method of restoring the three-dimensional shape of objects from two-dimensional images and the method of spectral analysis were considered in detail improved performance. On the basis of dimensional and aberration calculations, the optimal elements in terms of optical parameters were selected and an experimental stand was assembled. Interference digital images of normal human erythrocytes and altered under the action of osmotic pressure, images of peripheral blood cells for illumination by three types of coherent radiation were obtained. To implement three-dimensional modelling developed a program in Python using Numpy and Open CV libraries and a program that allows to build and visualize three-dimensional models of two-dimensional images, running Windows, written in C ++. A DirectX library and a graphics accelerator are used to display 3D models. The method of visualization of three-dimensional models on two-dimensional images makes it possible to change the scale of the surface and the type of projection used, to work in real time in interactive mode. The method of spectral analysis with processing of images of erythrocytes for enlightenment obtained in three frequency bands of coherent light, after further correlation of the obtained results will significantly improve the accuracy of determining its morphological parameters. The proposed improved methods allow using them to determine the state of the plasma membranes of erythrocytes in order to assess possible pathologies, which will increase the effectiveness of laboratory diagnostic methods.

Keywords: laboratory diagnostics; coherent radiation; interference image of erythrocytes; digital processing; three-dimensional image; spectral analysis

Вступ

Сьогодні в охороні здоров'я рівень діагностики захворювання і оцінки ефективності проведеного лікування визначаються наявністю і використанням у лікувальних установах новітніх медичних приладів,

систем та лабораторних технологій. Сучасні методи медичної діагностики стану пацієнта неможливі без комплексного обстеження функціонування усіх систем організму, без використання високотехнологічного електронного устаткування і нових методів дослідження. Розробка таких методів

базується на передових досягненнях в галузі біомедицини, електроніки, та інших наукових напрямків, які дозволяють отримати достовірну інформацію про стан організму пацієнта і працездатності всіх його систем [1].

Невід'ємною частиною клінічного обстеження хворого та постановки достовірного діагнозу є лабораторна діагностика. Без даних лабораторної діагностики неможливо також відстеження ефективності призначеного лікування та оцінки раціональності проведеної терапії [2].

При цьому найважливішим аналізом для лабораторних медичних досліджень є кров людини, що бере участь в роботі практично всіх його органів і несе інформацію про процеси, що відбуваються у них. Близько половини всього обсягу крові дорослої людини припадає на еритроцити, у складі яких міститься гемоглобін – білок, що відповідає за транспорт кисню і вуглекислого газу в усьому організмі. До основних методів клінічної діагностики відноситься загальний (клінічний) аналіз крові. Цей аналіз включає дослідження кількісного і якісного складу формених елементів крові, в тому числі вивчення морфології еритроцитів [3].

Аналіз наявності діагностичних ознак на підставі динаміки морфологічних змін еритроцитів показав, що морфологічне дослідження еритроцитів є цінним доповненням до визначення їх загального числа, і до дослідження гемоглобіну. Крім того існує залежність стану кровоносної системи пацієнта і ряду важливих у діагностичному і прогностичному відношенні патологічних змін в еритроцитах. На практиці часто не представляється можливим поставити діагноз якого-небудь захворювання крові, а особливо провести диференціальну діагностику анемій, не враховуючи морфологію еритроцитів. Гематологічні захворювання характеризуються зміною складу крові, що обумовлено захворюванням органів кровотворення або бути ознакою різних патологічних процесів з боку інших органів і систем [4,5]. Тому завдання підвищення точності визначення морфології еритроцитів крові з використанням удосконаленого методу інтерференційної мікроскопії та подальшої цифровою обробкою відео зображень, є важливою та актуальною науково-технічною задачею, яка вирішується у цій роботі.

Мета роботи

Метою роботи є вдосконалення методів тривимірної візуалізації для визначення морфологічних ознак фазових об'єктів шляхом підвищення ефективності та оптимізація засобів реалізації методу інтерференційної мікроскопії, що застосовується для дослідження стану плазматичних мембран.

Теоретичне обґрунтування запропонованої методів

Як відомо, для дослідження мікрооб'єктів, до яких відносяться і еритроцити, використовують мікроскопію. Основне призначення мікроскопії полягає в отриманні збільшеного зображення мікрооб'єктів, що дозволяє дати кількісну і якісну оцінку їх стану. На цей час розрізняють декілька видів мікроскопії. Світлова мікроскопія включає звичайну світлопільну та темнопільну мікроскопію, фазово-контрастну, люмінесцентну, інтерференційну та інші [6]. До сучасних методів мікроскопії відносяться поляризаційна, рентгенівська, електронна мікроскопії [7]. Всі перераховані види мікроскопії, за винятком електронної, будують зображення предметів на площині, що не дозволяє в достатній мірі відобразити повну інформацію про морфологію предметів. Також якісне вирішення цих завдань не задовольняє зростаючі вимоги медичної діагностики. Для оцінки динаміки зміни морфології еритроцитів необхідно мати об'ємну інформацію щодо їхньої форми. Проведений аналіз показав, що для досягнення поставленої мети доцільно використати метод інтерференційної мікроскопії з подальшою цифровою обробкою сигналів. Для дослідження цієї можливості, автори розробили експериментальний стенд, що дозволяє відпрацювати способи отримання інтерференційного зображення еритроцитів з отриманням вихідних даних у цифровій формі для математичної обробки [8].

На відміну від існуючих аналогів, прилад, що реалізує запропоноване дослідження, має ряд удосконалень, які підвищують його технічні та економічні показники. Так для підвищення якості зображення еритроцитів крові була проведена оптимізація оптичних елементів приладу, що дозволило значно зменшити втрату світла в системі, підвищити роздільну здатність, виявити зміну поляризації мікрооб'єктами, забезпечити зміну збільшення без перефокусування. Для зниження масогабаритних показників приладу була проведена модернізація його вузлів [8,9].

Для отримання тривимірного зображення еритроцитів автори пропонують використати методи цифрової обробки сигналів на основі подвійного перетворення Фур'є, з накладанням смугового фільтру, метод візуалізації тривимірної форми об'єктів за двовимірними знімками та метод спектрального аналізу.

Метод цифрової обробки сигналів на основі подвійного перетворення Фур'є.

Вхідним знімком для математичної обробки цифрових сигналів є знімок інтерференційної картини еритроцитів, побудованого променями, що дифрагують (Рис. 1).

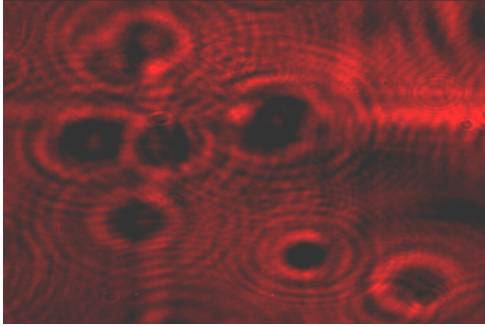


Рис.1 – Знімок інтерференційного зображення еритроцитів

Далі, отримані в результаті експерименту зображення були оброблені із використанням методів цифрової обробки сигналів [10,11], що дозволило визначити геометричні характеристики еритроцитів.

Згідно дослідження [10], у разі випадку інтерференції двох променів загальне зображення може бути представлено формулою (1):

$$I(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos(\varphi(x, y)), \quad (1)$$

де x, y – координати екрану; $a(x, y)$ – зображення екрану; $b(x, y)$ – амплітудна модуляція зображення.

Для отримання корисної інформації в натуральному вираженні (1), необхідно було виокремити значення функції $b(x, y)$. Для цього автори використали метод на основі перетворення Фур'є [11].

Відповідно до цього методу необхідно виконати двомірне перетворення Фур'є над зареєстрованим зображенням. Так як функція $I(x, y)$ реєструється за допомогою цифрової камери, то на практиці замість неперервної функції маємо двомірний масив значень I_{jk} . Діапазон змін індексів j, k визначається здатністю камери і розміром зображення ($M \times N$) пікселів.

Уданому випадку дискретне перетворення Фур'є має вигляд (2)

$$\mathfrak{F}_{jk} = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} I_{mn} \exp \left[-2\pi i \left(\frac{mj}{M} + \frac{nk}{N} \right) \right] \quad (2)$$

$$j = 0, \dots, M-1; k = 0, \dots, N-1$$

На наступному етапі було виконано фільтрацію спектра. Для цього був використаний смуговий фільтр у формі півкільця (рис. 2).

З математичної точки зору процес фільтрації записується як множення спектра Фур'є (2) на фільтр.

$$\mathfrak{F}_{jk}^* = \mathfrak{F}_{jk} F_{jk} \quad (3)$$

Після чого виконується зворотне перетворення Фур'є, за формулою (4):

$$I_{jk}^* = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} \mathfrak{F}_{mn}^* \exp \left[2\pi i \left(\frac{mj}{M} + \frac{nk}{N} \right) \right] \quad (4)$$

$$j = 0, \dots, M-1; k = 0, \dots, N-1$$

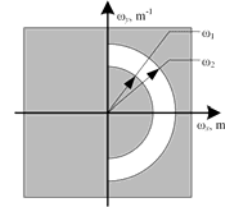


Рис.2 – Ескіз функції смугового фільтра

Отримане зображення I_{jk}^* буде комплексним. Далі необхідно по відомим співвідношенням отримати його модуль і фазу.

Таким чином, запропонований алгоритм обробки зображення має вигляд:

Крок 1. Відкриваємо зареєстроване зображення і переводимо його в відтінки сірого

Крок 2. Обчислюємо Фур'є спектр

Крок 3. Накладаємо кільцевої фільтр з параметрами

Крок 4. Виконуємо зворотне перетворення Фур'є від відфільтрованого спектру

Крок 5. Визначаємо модуль і фазу зображення.

Крок 6. Виокремлюємо центральну область зображення відновленої фази

Крок 7. Згладжування результатів за допомогою фільтра Гауса.

Крок 8. Візуалізація отриманого зображення еритроцита у вигляді карти висоти. Приклади карт висоти виділеної області для одного еритроцита наведені на рис. 3. Зазначені варіанти отримані при різних режимах згладжування: без згладжування, розмір вікна фільтра згладжування $3 \times 3, 7 \times 7, 11 \times 11$.

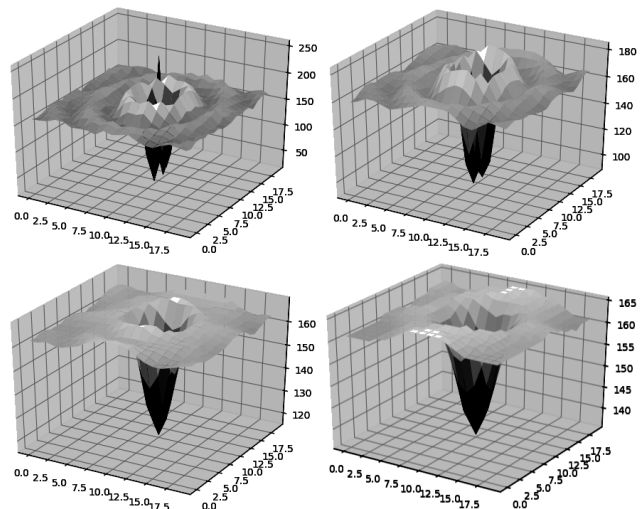


Рис. 3 – Карта висоти виокремленої області для одного еритроцита

Для реалізації представленого алгоритму була розроблена програма на мові Python із використанням бібліотек Numpy і Open CV.

Отримані результати показують можливість спрощення методу відновлення геометричної моделі об'єктів голографічної інтерферометрії шляхом використання спеціальних масок просторовій області, наприклад, Гаусове згладжування і т.п.

Використання методу цифрової обробки сигналів на основі подвійного перетворення Фур'є дозволило нам отримати алгоритм обробки зображення для визначення морфологічних ознак фазових об'єктів.

Метод візуалізації тривимірних моделей по двовимірним знімкам.

Вхідними даними є знімки, отримані на приладі: без зразків і зі зразками еритроцитів, за якими побудована карта щільності (Рис. 4).

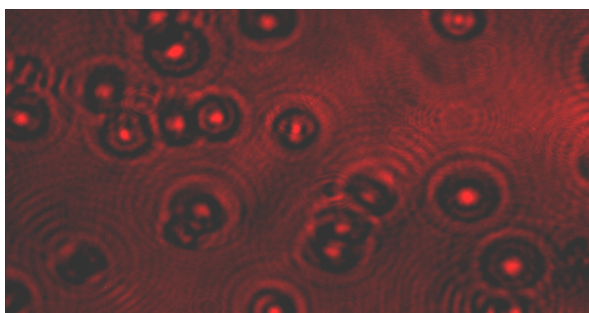


Рис.4 – Зображення еритроцитів когерентними хвилями

Програма обробки зображення працює під управлінням ОС Windows, написана на мові C++. Для виведення 3D моделей використовується бібліотека Direct X і графічний прискорювач.

Основний алгоритм по карті щільності синтезує 3D сітку трикутників, що використовується для апроксимації поверхні, накладає на неї вибраний користувачем градієнт, закодований у вигляді 1D-текстури, як текстурної координати в розгортці використовується значення щільності. Після чого, отримана поверхня раструється за допомогою графічного прискорювача з обраного користувачем кута спостереження (рис. 5).

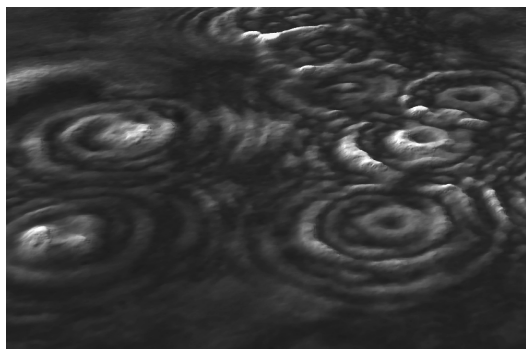


Рис.5 – Зображення еритроцитів когерентними хвилями

В інтерфейсі програмі є можливість окремо змінювати масштаби поверхні (по вертикалі і загальний) і тип проекції. Програма працює в реальному часі, користувач має можливість змінювати налаштування візуалізації (градієнт, кут спостереження, масштаб і проекцію) в інтерактивному режимі. Також, є можливість накладати освітлення на поверхню, для кращого візуального сприйняття зображення моделі людиною. Для цього додатково розраховується карта нормалей.

Метод спектрального аналізу.

Сутність методу спектрального аналізу для визначення товщини еритроциту у тому, що поглинання світла молекулами проявляється в ослабленні світлового потоку після його проходження через об'єкт [12].

При цьому на квітку з розчином досліджуваної речовини подається монохроматичне світло з інтенсивністю I_0 . Якщо молекули речовини поглинають світло, то інтенсивність світла зменшується до величини I . Величину рівну $T = I/I_0$ називають коефіцієнтом пропускання, а вираз:

$$1 - T = \frac{I_0 - I}{I_0} - \text{коефіцієнтом поглинання.} \quad (5)$$

Поглинання світла розчином речовини тим більше, чим вище концентрація речовини, товщина розчину і здатність речовини поглинати світло тієї чи іншої довжини хвилі.

Ці закономірності виражаються законом Бугера-Ламберта-Бера (6):

$$D = -\lg T = \varepsilon sl, \quad (6)$$

де D – оптична щільність зразка, ε – молярний коефіцієнт поглинання (л/(моль*см)), s – молярна концентрація речовини, l – товщина розчину (см).

Величина ε не залежить від концентрації речовини і при відсутності взаємодії між молекулами є для кожної речовини функцією довжини хвилі світла [12].

Таким чином, враховуючи залежність (рис. 6) коефіцієнта а поглинання від довжини хвилі при спостереженні еритроцитів на просвіт можна побудувати наступну модель проходження світла через зразок.

$$yk = xki + D, \quad (7)$$

де $k = 1, 2, 3$ номер зображення (синій, зелений, червоний), yk – яскравість в даній точці зображення еритроцита, xk – коефіцієнт, що характеризує ступінь поглинання лазерного випромінювання при проходженні через еритроцит. Залежить від молярної концентрації, інтенсивності випромінювання, але,

головне, пропорційний коефіцієнту пропускання на цій хвилі, l – товщина еритроцита в даній точці, D – складова яскравості, обумовлена прозорістю розчину, домішками, сторонніми включеннями. Може розглядатися як перешкода.

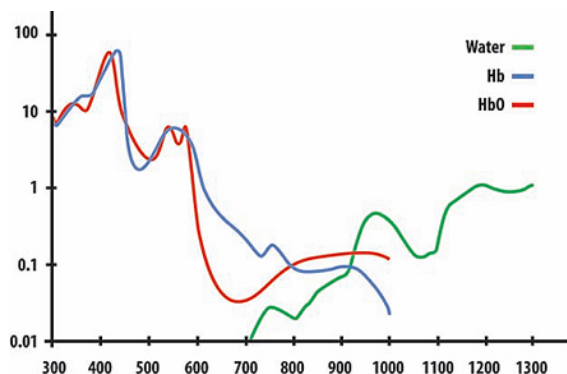


Рис. 6 – Залежність коефіцієнта поглинання від довжини хвилі

Спробуємо визначити максимально наближене до істинного значення товщини еритроцита l . Для цього застосуємо метод найменших квадратів. Запишемо (6) у вигляді полінома першого ступеня:

$$y_k = x_k a_1 + a_0. \quad (8)$$

Мінімізуємо середньоквадратичне відхилення

$$E = \sum_{k=1}^3 (y_k - x_k a_1 - a_0)^2 \rightarrow \min. \quad (9)$$

Застосуємо стандартну процедуру знаходження коефіцієнтів методів найменших квадратів – диференціювання (9) по a_1 і a_0 і прирівнювання похідних нулю. В результаті отримуємо систему нормальних рівнянь:

$$\begin{cases} a_1 \sum_{k=1}^3 x_k + 3a_0 = \sum_{k=1}^3 y_k \\ a_1 \sum_{k=1}^3 x_k^2 + a_0 \sum_{k=1}^3 x_k = \sum_{k=1}^3 y_k x_k \end{cases} \quad (10).$$

Вирішив (10), отримуємо вираз для товщини еритроцита:

$$l = a_1 = \frac{3 \sum_{k=1}^3 y_k x_k - \sum_{k=1}^3 x_k \sum_{k=1}^3 y_k}{3 \sum_{k=1}^3 x_k^2 - \sum_{k=1}^3 x_k \sum_{k=1}^3 x_k}. \quad (11)$$

Таким чином, вираз (11) дозволяє отримати товщину еритроцита у довільній точці, тобто отримати третю координату для відображення його морфологічних параметрів.

Вхідними знімками для методу спектрального аналізу є зображення еритроцитів когерентними хвилями трьох довжин (Рис. 7).

Морфологічний аналіз форми еритроцитів на просвітлення трьома видами лазеру за знітками дозволяє візуально визначити ступінь їх спотворення відносно норми, та на підставі цього зробити медичну діагностику стану пацієнта [13].

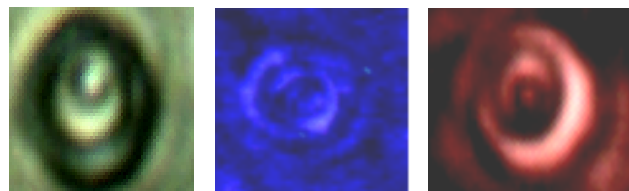


Рис. 7 – Зображення еритроциту на просвітлення трьома видами лазеру.

Обробка зображень еритроцитів на просвітлення, отриманих у трьох частотних діапазонах когерентного світла, після подальшої кореляції отриманих результатів дозволить значно підвищити точність визначення його морфологічних параметрів.

Програмне забезпечення, що на цей час створюється авторами, дозволить отримати математичний опис морфології еритроцитів, що на порядок підвищить точність визначення морфологічних параметрів еритроцитів крові, тим самим значно підвищить точність і достовірність медичних діагностичних ознак.

Висновки

Як видно, запропоновані авторами методи тривимірної візуалізації для визначення морфологічних ознак фазових об'єктів шляхом підвищення ефективності та оптимізація засобів реалізації методу інтерференційної мікроскопії, що застосовується для дослідження стану плазматичних мембран, дозволяють відновити тривимірну картину мікрооб'єктів, зокрема еритроцитів, з високою вірогідністю. Це дає можливість отримати необхідну та достатню інформацію про їхню морфологію для оцінки динамічних процесів, що відбуваються у досліджуваних клітинах периферичної крові, а це у свою чергу дозволяє визначити ступінь їх функціональності. Отримані результати, як наслідок, сприятимуть вдосконаленню методів лабораторної діагностики та зроблять більш якісним та більш доступним обстеження пацієнтів через спрощення процедури клінічного дослідження крові. Описані вище методи також застосовні для побудови тривимірних моделей будь-яких фазових мікрооб'єктів, що є більш досконалим напрямком у мікроскопії.

Список літератури

1. Sokol Y., Kolisnyk K., Panibrattseva S., Bernadskaya T. The Use of Digital Interferometry Device to Analyze the State of Red Blood Cell Membranes. *2020 IEEE KhPI Week of Advanced Technology. Kharkiv: NTU «KhPI»*. 2020. P. 379. doi: 978-0-7381-4236-4/20/\$31.00.
2. Файнштейн Ф. Э., Козинец Г. И., Бахрамов С. М., Хохлова М. П. *Болезни системы крови*. Ташкент: Медицина, 1987. 670 с.
3. Ронин В. С., Старобинец Г. М. *Руководство к практическим занятиям по методикам клинических лабораторных исследований*. Москва: Медицина, 1989. С. 217–237.
4. Долгов В. В., Луговская С. А., Морозова В. Т. *Лабораторная диагностика анемий*. Ташкент: Триада. 2009. С. 149–154.
5. Levina A. A., Mesheryakova L. M., Tsibulskaya M. M., Sokolova T. V. The differential diagnostic of anemia, *Клиническая лабораторная диагностика*. 2015. 60(12). P. 26–30.
6. Скворцов Г.Е. *Микроскопы*. Ленинград: Машиностроение. 1984. С. 508–550.
7. Микроскопическая техника в биологии URL: http://labx.narod.ru/documents/metody_microscopirovaniya.html (дата звернення 18.02.2021).
8. Сокол Є. І., Бернадська Т.В., Колесник К. В., Томашевський Р. С. Патент №138635 Україна. *Мікроскоп для отримання тривимірного зображення мікрооб'єктів, що заломлюють світло*. Зареєстрований 10.12.2019.
9. Сокол Є. І., Бернадська Т. В., Колесник К. В., Томашевський Р. С Патент №141606 Україна. *Інтерференційний голографічний мікроскоп з автоматизованою зміною збільшення та покращеними оптико-технічними характеристиками*. Зареєстрований 27.04.2020.
10. Ravel R. *Clinical Laboratory Medicine*. Chicago, 1989. 692p.
11. Winter ME et al. *Basic Clinical Pharmacokinetics. Applied Therapeutics*. Vancouver. 1994. 93 p.
12. Владимиров Ю. А., Потапенко А. Я. *Физико-химические основы фотобиологических процессов*. Москва: Высшая школа. 1989. С. 7–23.
13. Берчану Шт. *Клиническая гематология*. Бухарест. 1986. С. 80–87.

References (transliterated)

1. Sokol Y., Kolisnyk K., Panibrattseva S., Bernadskaya T. The Use of Digital Interferometry Device to Analyze the State of Red Blood Cell Membranes. *2020 IEEE KhPI Week of Advanced Technology. Kharkiv: NTU «KhPI»*, 2020, pp. 379, doi: 978-0-7381-4236-4/20/\$31.00.
2. Fainshtein F. E., Kozinets G. I., Bakhrarov S. M., Khokhlova M. P. *Diseases of the blood system*. Tashkent, Medicine, 1987, 670 p.
3. Ronin V. S, Starobinets G. M. *Rukovodstvo k prakticheskim zanyatiyam po metodikam klinicheskikh laboratorny khissledovaniy [Guide to Practical Exercises in Clinical Laboratory Research Techniques]*. Moscow, Medicine, 1989, pp. 217–237.
4. Dolgov V. V., Lugovskaya S. A., Morozova V. T. *Laboratornaya diagnostika anemiy [Laboratory diagnostics of anemia]*. Tashkent, Triad, 2009, 149 p.
5. Levina A. A., Mesheryakova L. M., Tsibulskaya M. M., Sokolova T.V. The differential diagnostic of anemia. *Clinical laboratory diagnostics*, 2015, 60(12), 26–30.
6. Skvortsov G.E. *Mikroskopy [Microscopes]*. Leningrad, Mechanical Engineering, 1984, 508 p.
7. Microscopic technology in biology. Available at: http://labx.narod.ru/documents/metody_microscopirovaniya.html (accessed 18.02.2021).
8. Sokol Ye. I., Bernadska T. V., Kolesnik K. V., Tomashevskiy R.S. Patent no 138635 Ukraine. *Mi`kroskop dlya otrimannya trivimi`rnogo zobrazhennya mi`kroob`yektiv, shho zalomlyuyut` svi`tlo [Microscope for rejecting the trivial image of microobjects, which will break the light]*. Registered 10.12.2019.
9. Sokol Ye. I., Bernadska T. V., Kolesnik K.V., Tomashevskiy R.S. Patent no 141606 Ukraine. *I`nterferenci`jniy golografi`chniy mi`kroskop z avtomatizovanoyu zmi`noyu zbi`lshennya ta pokrashhenimi optiko-tekhni`chnimi kharakteristikami [Interference holographic microscope with automated change in optical and technical characteristics]*. Registered 27.04. 2020.
10. Ravel R. *Clinical Laboratory Medicine*. Chicago, 1989, 692 p.
11. Winter ME et al. *Basic clinical pharmacokinetics. Applied therapeutics*. Vancouver, 1994, 93 p.
12. Vladimirov Yu. A., Potapenko A. Ya. *Fiziko-khimicheskie osnovy` fotobiologicheskikh processov [Physico-chemical foundations of photobiological processes]*. Moscow: Higher school, 1989, pp. 7–23.
13. BerchanuSht. *Klinicheskaya gematologiya [Clinical hematology]*. Bucharest, 1986, pp. 80–87.

Відомості про авторів (About authors)

Сокол Євген Іванович – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», ректор, м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0003-1960-3445; e-mail: sokol@kpi.kharkov.ua

Yevhen Sokol – doctor of technical sciences, professor, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, rector, Kharkiv, Ukraine, ORCID: 0000-0003-1960-3445, e-mail: sokol@kpi.kharkov.ua

Колісник Костянтин Васильович – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач навчальної лабораторії біомедичної електроніки, м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0003-1417-6608; e-mail: kolesniknet@ukr.net

Kostiantyn Kolisnyk – candidate of technical sciences, professor, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Head of the Training Laboratory of Biomedical Electronics; ORCID: 0000-0003-1417-6608, e-mail: kolesniknet@ukr.net.

Бернадська Тетяна Володимирівна – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри промислової та біомедичної електроніки, м. Харків, Україна; e-mail: tatyana.bernadskaya@gmail.com

Tatiana Bernadska – National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, postgraduate student of the Department of Industrial and Biomedical Electronics, Kharkiv, Ukraine; e-mail: tatyana.bernadska@gmail.com

Будь ласка, посилайтеся на цю статтю таким чином:

Сокол Є. І., Колісник К. В., Бернадська Т. В. Удосконалення методів тривимірної візуалізації для визначення морфологічних ознак фазових мікрооб’єктів. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». 2021. № 1 (7). С. 47-53. doi:10.20998/2413-4295.2021.01.07.

Please cite this article as:

Sokol Ye. I., Kolisnyk K. V., Bernadska T. V. Improvement of three-dimensional visualization methods for determination of morphological features of phase microobjects. *Bulletin of the National Technical University “KhPI”. Series: New solutions in modern technology.* – Kharkiv: NTU “KhPI”, 2021, no. 1 (7), pp. 47-53, doi:10.20998/2413-4295.2021.01.07.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Сокол Е. И., Колесник К. В., Бернадская Т. В. Усовершенствование методов трехмерной визуализации для определения морфологических признаков фазовых микрообъектов. *Вестник НТУ «ХПИ», Серия Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». 2021. № 1 (7). С.47-53. doi:10/209998/2413-4295.2021.01.07.

АННОТАЦИЯ В работе предложено использование методов физического и математического трехмерного моделирования фазовых микрообъектов, в частности эритроцитов крови, с целью определения морфологических изменений. Подробно рассмотрены: метод цифровой обработки сигналов на основе двойного преобразования Фурье, с наложением полосового фильтра, метод восстановления трехмерной формы объектов по двумерным снимками и метод спектрального анализа. Для экспериментального исследования была разработана принципиальная оптическая схема устройства отображения цифрового изображения микрообъектов с улучшенными эксплуатационными характеристиками. На основе габаритного и абберационного расчетов выбраны оптимальные по оптическим показателям элементы и собран экспериментальный стенд. Полученные интерференционные цифровые снимки эритроцитов крови человека в норме и измененных под действием осмотического давления, снимки клеток периферической крови на просвет тремя видами когерентного излучения. Для реализации трехмерного моделирования разработана программа на языке Python с использованием библиотек NumPy и Open CV и программа, позволяющая строить и визуализировать трехмерные модели по двумерным снимкам, которая работает под управлением ОС Windows, написанная на языке C++. Для вывода 3D моделей используется библиотека Direct X и графический ускоритель. Метод визуализации трехмерных моделей по двумерным снимкам дает возможность изменять масштабы поверхности и выбирать тип проекции, работать в реальном масштабе времени в интерактивном режиме. Метод спектрального анализа с обработкой изображений эритроцитов на просвет, полученных в трех частотных диапазонах когерентного света, после дальнейшей корреляции полученных результатов позволит значительно повысить точность определения его морфологических параметров. Предложенные усовершенствованные методы позволяют использовать их для определения состояния плазматических мембран эритроцитов крови с целью оценки возможных патологий, тем самым повышают эффективность методов лабораторной диагностики.

Ключевые слова: лабораторная диагностика; когерентное излучение; интерференционное изображение эритроцитов; цифровая обработка; трехмерное изображение; спектральный анализ

Надійшла (received) 19.02.2021

УДК 629.1-46

doi:10.20998/2413-4295.2021.01.08

РОЗРАХУНОК ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ АВТОМОБІЛЬНОГО ПОТОКУ НА ТРАНСПОРТНІЙ РОЗВ'ЯЗЦІ

О. О. СОЛАРЬОВ^{1*}, М. О. МІКУЛІНА², О. В. ТАЦЕНКО²

¹кафедра тракторів, сільськогосподарських машин та транспортних технологій, Сумський національний аграрний університет, м. Суми, УКРАЇНА

² кафедра експлуатації техніки, Сумський національний аграрний університет, м. Суми, УКРАЇНА

*e-mail: lmcspan@i.ua.

АНОТАЦІЯ Пропускна здатність ділянки дороги є ключовим елементом та залежить від багатьох факторів, таких як: ширина проїжджої частини, допустимої видимості, уклонів, радіусів поворотів, складу автомобілів, можливості маневрів та конструкції автомобілів. Розвиток автомобілебудування призводить до покращення експлуатаційних можливостей автомобілів та покращенню показників пропускної здатності. Зміна усіх цих складових призводить до зміни пропускної здатності. Склад транспортного потоку під час розрахунку пропускної здатності є одним з ключових факторів. Рухомий транспортний потік характеризується складом в ньому різних (за віком та призначенням) транспортних засобів. Склад транспортного потоку відображається в процентному відношенні. Отримання та аналіз алгоритму визначення пропускної здатності транспортного потоку на певній ділянці дороги (розв'язці). Зроблено аналіз існуючого стану автомобіле-використання в Україні та вибір оптимального алгоритму для отримання реальних даних потоку на ділянці дороги. Основною задачею інженера під час проектування певної ділянки дороги є забезпечення максимальної пропускної здатності ділянки дороги. Максимальна пропускна здатність досягається шляхом покращення дорожнього покриття, розширення дорожнього полотна (збільшення кількості рухомих смуг та встановленні відповідних знаків), виділення реверсивних смуг руху та встановлення реверсивних світлофорів. Під час розрахунку пропускної здатності необхідно враховувати характеризуючий взаємозв'язок між автомобілями у потоці в різних дорожніх умовах. Інтервали між автомобілями в потоці можуть змінюватися навіть при високій інтенсивності руху, що в свою чергу досить коректує показник пропускної здатності. Досить суттєво інтервали змінюються при появі у потоці вантажних автомобілів, спеці техніки, або автобусів.

Ключові слова: автомобільний потік; пропускна здатність; транспортний потік; транспортна розв'язка

CALCULATION OF CAR TRAFFIC CAPACITY AT THE CROSSROAD

O. SOLAROV, M. MIKULINA², O. TATSENKO²

¹Department of Tractors, Agricultural Machinery and Transport Technologies, Sumy National Agrarian University, Sumy, UKRAINE.

² Department of Engineering Operation, Sumy National Agrarian University, Sumy, UKRAINE.

ABSTRACT The capacity of a road section depends on many factors, such as the width of the carriageway, the permissible visibility, the slopes, the turning radii, the composition of the cars, the maneuverability and the design of the cars. The development of the automotive industry leads to improved performance of cars and improved throughput. Changing all of these components changes the bandwidth. When the capacity is calculating the composition of the traffic flow became one of the key factors. Mobile traffic is characterized by the composition of different (by age and purpose) vehicles. The composition of the traffic flow is displayed as a percentage. Obtaining and analyzing the algorithm for determining the capacity of traffic flow on a particular section of road (interchange). The analyze of the current state of car use in Ukraine and select the optimal algorithm for obtaining real flow data on the road section was made. The main task of the engineer during the design of a certain section of the road is to ensure the maximum capacity of the road section. Maximum throughput is achieved by improving the road surface, widening the roadway (increasing the number of lanes and installing appropriate signs), allocating reversing lanes and installing reversing traffic lights. When calculating the capacity, it is necessary to take into account when characterizing the relationship between cars in the flow in different road conditions. Intervals between cars in a stream can change even at high intensity of movement that in turn quite corrects a capacity indicator. Quite significantly, the intervals change when there is a flow of trucks, special equipment, or buses.

Keywords: car flow; bandwidth; traffic flow; traffic interchange

Вступ

Важливим завданням для інженера під час розрахунку пропускної здатності ділянки дороги є правильний вибір методики розрахунку. Існуючі методики не завжди дають змогу отримати необхідні дані пропускної здатності через свою складність, або

відсутністю важливих факторів, які саме і є ключовими.

Аналіз питання та мета роботи

Пропускна здатність автомобільних доріг залежить від багатьох факторів. У першу чергу це такі

фактори як: дорожні умови (ширина проїзної частини, покриття, місця можливих роз'їздів, необхідної видимості в зустрічному напрямі та ін.), можливого потоку автомобілів, погодно-кліматичних умов та частоти їхньої зміни, можливості утворення заторів, необхідних засобів регулювання руху та інших [1–3]. Особливу увагу слід приділити такому фактору, як можливість утворення заторів у разі дорожньо-транспортних пригод [4,5]. Так як, у сучасних реаліях кількість автомобілів у нашій країні стрімко збільшується і у результаті автомобільні дороги постійно перенасичуються транспортними засобами, які по них переміщуються. На рис. 1, 2 наведено графік збільшення кількості автомобілів на дорогах України в період з 2016 по 2020 роки та кількість проданих автомобілів за 2018–2020 рік [6,7].

Важливим фактором під час розрахунку пропускної здатності є також конструкція автомобілів та їх технічні особливості. В свою чергу розвиток технічної складової автомобілів та значно менший вік зменшує кількість відмов автомобілів та кількості дорожньо-транспортних пригод, що в свою чергу призводить до заторів на дорогах та ускладнень руху. На рис. 3. Наведено графік з кількістю автомобілів певних вікових груп. З графіка ми бачимо, що переважна кількість автомобілів близько 45 % середнього віку 20 років.

Вклад основного матеріалу

Основні фактори, які впливають на визначення пропускної здатності розв'язки це: годинна інтенсивність руху автомобілів, коефіцієнт нерівномірності розподілення інтенсивності руху, який в середньому складає 0,6. Таким чином розрахункова пропускна здатність розраховується наступним чином:

$$N_q = 0,075N_{\text{авто/добу}}; \quad (1)$$

де 0,75 – розрахунковий коефіцієнт інтенсивності руху; $N_{\text{авто/добу}}$ – середньодобова завантаженість ділянки, кількість автомобілів за добу.

Розраховуючи пропускну здатність транспортної розв'язки слід також враховувати такий фактор, як місце розташування (підйом, спуск, ділянка з обмеженою видимістю на під'їзді та інші) [8–11]. Коефіцієнт нерівномірності розподілу руху становить у межах 0,6, таким чином розрахункова годинна інтенсивність руху буде визначатися в одну та іншу сторону:

$$N_a = 0,045N_{\text{авто/добу}}; \quad (2)$$

$$N_b = 0,03N_{\text{авто/добу}}. \quad (3)$$

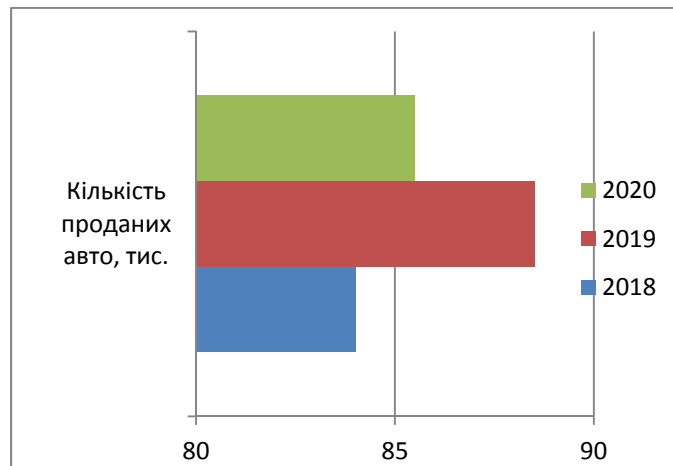


Рис. 1 – Кількість проданих авто в Україні

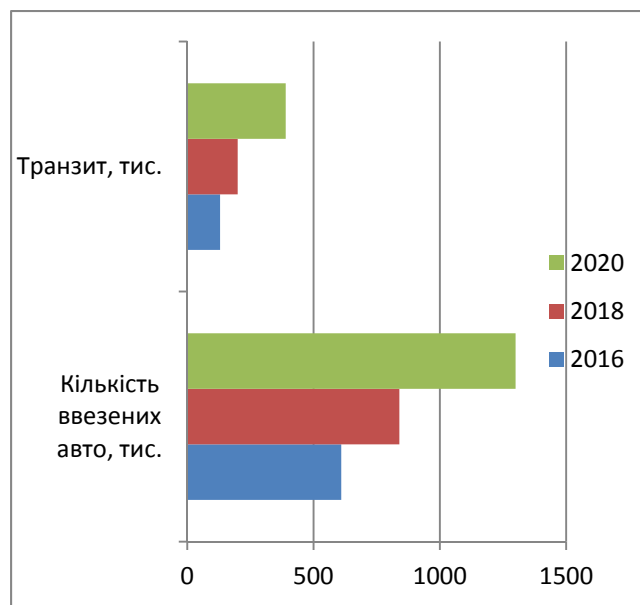


Рис. 2 – Тенденція збільшення автомобілів на дорогах України

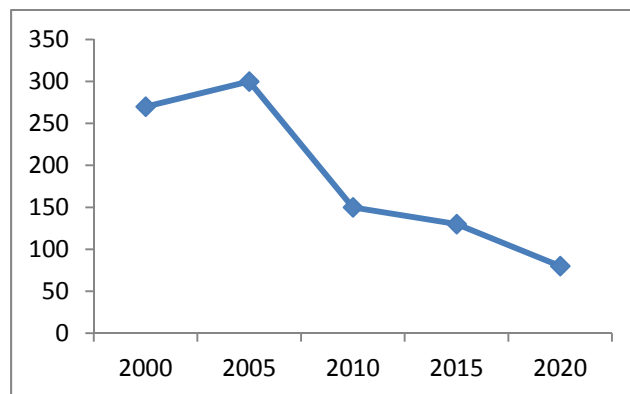


Рис. 3 – Середній вік автомобілів на території України

Важливим етапом під час проектування транспортної розв'язки та визначення її пропускної здатності є прогнозування динаміки руху на даній ділянці дороги. Цей показник необхідно обов'язково враховувати аналізуючи дані завантаження автомобільним транспортом регіону за останні 10–15 років. Закономірності зміни інтенсивності руху розраховуються наступним чином:

$$N_p = N_1 + \Delta N_i \text{ – інтенсивність по рокам.}$$

$$N_p = N_1 \left(\frac{P_n}{100} + 1 \right)^{t-1}$$
 – при зміні інтенсивності за законом геометричної прогресії.

Для доріг, які мають тенденцію до зменшення інтенсивності руху, пропускна здатність розраховується наступним чином:

$$N_p = N_1 \left(1 + 0,01(a(t-1) + \sum_{t=2}^T b(t-1)^{-1,3}) \right); \quad (4)$$

де N_1 – інтенсивність руху у першому році з вибраного періоду; P_n – середній річний приріст інтенсивності руху у відсотках; ΔN_i інтенсивність руху автомобілів за добу; T – термін перспективи; a і b – імпіричні коефіцієнти, які мають залежність від початкового темпу відносно приросту інтенсивності руху.

Важливим показником при визначенні пропускної здатності певної ділянки дороги є дистанція між автомобілями, які рухаються по ділянці дороги. Частіше всього використовують таке поняття, як «динамічний габарит» рис. 4. Динамічний габарит включає в себе різницю гальмівного шляху, який проходить автомобіль при гальмуванні, габаритні розміри (довжина бази автомобіля) [12–15]. Динамічний габарит визначається наступним чином:

$$L_d = \frac{v^2}{2} \left(\frac{1}{f_1} - \frac{1}{f_2} \right); \quad (5)$$

де v – швидкість руху автомобілів, м/с; f_1 і f_2 – коефіцієнт максимального уповільнення руху автомобілів, м/с².

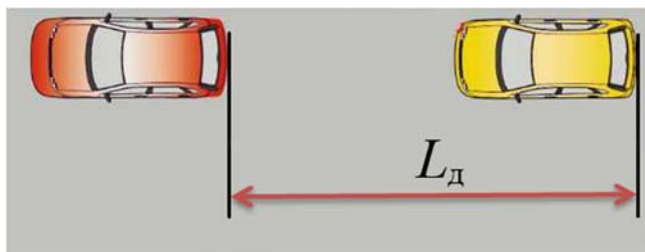


Рис. 4 – Динамічний габарит

Погодні умови є також значним фактором, що впливає на завантаженість та пропускну здатність дороги, так як, при ожеледиці дистанція між автомобілями значно збільшується і пропускна

здатність та завантаженість ділянки дороги зменшується.

Висновки та обговорення

Таким чином, на пропускну здатність впливає велика кількість факторів, найчастіше це фактори, що залежать від технічних параметрів автомобіля, дорожнього покриття та характеристики транспортного потоку. Характеристики взаємодії між автомобілями у дорожньому потоці дають дані для визначення пропускної здатності певної ділянки дороги чи розв'язки.

Основними характеристиками транспортного потоку є склад рухомого складу, інтенсивність руху, що визначаються на основі автоматизованого обліку руху автомобільного транспорту, або шляхом спостереження та підрахунку. Менш достовірними будуть результати, якщо проводити розрахунки із використанням середньодобової інтенсивності руху.

Швидкість руху є також важливим фактором, який краще визначати одним з експериментальних методів: 1) за рахунок фіксації швидкості руху спеціальної лабораторії в середині транспортного потоку; 2) спеціальних сигнальних датчиків, які закріплюються на узбіччі дороги, дослідної ділянки дороги.

Інтервал руху автомобілів у транспортному потоці визначається між передніми бамперами, або будь якими, симетричними точками на автомобілях. Саме інтервал руху це той фактор, який найбільше характеризує пропускну здатність полоси руху.

Список літератури

1. Державні будівельні норми України: Містобудування. *Планування і забудова міських і сільських поселень*. ДБН 360-92**. Київ, 2002. 140 с.
2. Державні будівельні норми України: *Споруди транспорту. Вулиці та дороги населених пунктів*. ДБН В.2.3-5-2001. Київ: Держбуд України, 2001. 51 с.
3. Савенко В. Я., Губа В. В. Визначення пропускної здатності автомобільної дороги. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. 2013. Вип. 90. С. 210-217.
4. Михайлов А. Ю., Попова Е. Л., Гайворонский И. Л. Анализ методик расчета пропускной способности пересечений в одном уровне. *Вестник Иркутского государственного технического университета*, 2018. 22. 12 (143). С. 231-238.
5. Пугачев И. Н. *Организация и безопасность дорожного движения: Учеб. Пособие*. Хабаровск: Изд-во Хабар. гос. техн. Ун-та, 2004. 232 с.
6. Стало відомо, скільки українці витратили на імпортні авто у 2019 році. 2020. URL: <https://hromadske.ua/posts/stalo-vidomo-skilki-ukrayinci-vitratili-na-importni-avto-u-2019-roci>. (Дата звернення 27 січня 2021).
7. Названа точна кількість автомобілів в Україні та їх середній вік. 2018. URL: https://auto.24tv.ua/nazvana-tochna-kilkist-avtomobiliv-v-ukraini-ta-yikh-serednii-vek_n6262. (Дата звернення 27 січня 2021).

8. *Руководство по оценке пропускной способности автомобильных дорог.* 1982. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data1/8/8535/index.htm>. (Дата звернення 27 січня 2021).
9. Васильев А. П., Сиденко В. М. *Эксплуатация автомобильных дорог и организация дорожного движения.* М.: Транспорт, 1990. 304 с.
10. Булавина Л. В. *Расчет пропускной способности магистралей и узлов.* Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ, 2009. 44 с.
11. Лобашов А. О. О прогнозировании скорости транспортных потоков на городских улицах. *Вестник ХГАДТУ.* Харьков : ХГАДТУ, 1999. С. 91–93.
12. Пропускная способность дороги. 2012. URL: <https://www.drivingplus.ru/driving/doroghoe-dvighenie/propusknaya-sposobnost-dorogi.html>. (Дата звернення 27 січня 2021).
13. Сильянов В. В., Домке Э. Р. *Транспортно-эксплуатационные качества автомобильных дорог и городских улиц: учебник для студ. высш. учеб. заведений.* Москва: Издательский центр «Академия», 2009. 352 с.
14. Білятинський О. А., Заворицький В. Й., Старовойда В. П. та ін. *Проектування автомобільних доріг.* Київ: Вища школа, 1997. 528с.
15. Гаврилов Е. В., Дмитриченко М. Ф., Доля В. К. [та ін.] *Системологія на транспорті. Організація дорожнього руху.* Київ : Знання України, 2007. 452 с.
16. *hosudarstvennoho tekhnicheskoho unyversyteta,* 2018, 22, 12 (143), 231-238.
17. Puhachev Y. N. *Orhanyzatsiya y bezopasnost dorozhnoho dvyzheniya: Ucheb. Posobyе.* Khabarovsk. Yzd-vo Khabar. hos. tekhn. Un-ta, 2004. 232 s.
18. Stalo vidomo, skilky ukrainsi vytratyly na importni avto u 2019 rotsi. 2020. Available at: <https://hromadske.ua/posts/stalo-vidomo-skilki-ukrayinci-vitratili-na-importni-avto-u-2019-roci>. (accessed 27.01.2021).
19. Nazvana tochna kilnist avtomobiliv v Ukraini ta yikh serednii vik. 2018. Available at: https://auto.24tv.ua/nazvana-tochna-kilnist-avtomobiliv-v-ukraini-ta-yikh-serednii-vik_n6262. (accessed 27.01.2021).
20. *Rukovodstvo po otsenke propusknoi sposobnosti avtomobilnykh doroh.* 1982. Available at: <https://files.stroyinf.ru/Data1/8/8535/index.htm>. (accessed 27.01.2021).
21. Vasyev A. P., Sydenko V. M. *Ekspluatatsiya avtomobilnykh doroh y orhanyzatsiya dorozhnoho dvyzheniya.* M. Transport, 1990. 304 s.
22. Bulavyna L. V. *Raschet propusknoi sposobnosti mahystralei y uzlov.* Ekaterenburh. HOU VPO UHTU, 2009. 44 s.
23. Lobashov A. O. O prohozyrovanyu skorosty transportnykh potokov na horodskykh ulytsakh. *Vestnyk KhHADTU.* Kharkov, KhHADTU, 1999, 91–93.
24. Propusknaia sposobnost dorohy. 2012. Available at: <https://www.drivingplus.ru/driving/doroghoe-dvighenie/propusknaya-sposobnost-dorogi.html>. (accessed 27.01.2021).
25. Sylianov V. V., Domke E. R. *Transportno-eksploatatsyonnye kachestva avtomobilnykh doroh y horodskykh ulyts: uchebnyk dlia stud. vissh. ucheb. zavedeniy.* Moskva. Yzdatelskiy tsentr «Akademyia», 2009. 352 s.
26. Biliatynskiy O. A., Zavorytskyi V. Y., Starovoida V. P. Et al. *Proektuvannia avtomobilnykh dorih.* Kyiv. Vyshcha shkola, 1997. 528 s.
27. Havrylov E. V., Dmytrychenko M. F., Dolia V. K. [ta in.] *Sistemolohiia na transporti. Orhanizatsiia dorozhnoho rukhu.* Kyiv. Znannia Ukrainy, 2007. 452 s.

References (transliterated)

1. Derzhavni budivelni normy Ukrainy. Mistobuduvannia. *Planuvannia i zabudova miskyykh i silskykh poselen.* DBN 360-92**. Kyiv, 2002. 140 s.
2. Derzhavni budivelni normy Ukrainy: *Sporudy transportu. Vulytsi ta dorohy naselenykh punktiv.* DBN V.2.3-5-2001. Kyiv: Derzhbud Ukrainy, 2001. 51 s.
3. Savenko V. Ya., Huba V. V. *Vyznachennia propusknoi zdatnosti avtomobilnoi dorohy. Avtomobilni dorohy i dorozhne budivnytstvo,* 2013, Vyp. 90, S. 210-217.
4. Mykhailov A. Yu., Popova E. L., Haivoronskiy Y. L. *Analyz metodyk rascheta propusknoi sposobnosti peresecheniy v odnom urovne. Vestnyk Yrkutskoho*

Відомості про авторів (About authors)

Соларьов Олександр Олексійович – кандидат технічних наук, доцент кафедри тракторів, сільськогосподарських машин та транспортних технологій, Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна, ORCID: 0000-0002-1485-0685; e-mail: lmcsan@i.ua.

Oleksandr Solarov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Tractors, Agricultural Machinery and Transport Technologies, Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine, ORCID: 0000-0002-1485-0685; e-mail: lmcsan@i.ua.

Мікуліна Марина Олександрівна – кандидат економічних наук, доцент кафедри експлуатації техніки, Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна, ORCID: 0000-0002-6918-5192; e-mail: marinamikulina1@ukr.net.

Маруна Мікуліна – Candidate of Economic Sciences, Associate Professor of the Department of Engineering Operation, Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine, ORCID: 0000-0002-6918-5192; e-mail: marinamikulina1@ukr.net.

Тащенко Олександр Володимирович – старший викладач кафедри експлуатації техніки, Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна, ORCID: 0000-0003-1762-8219, e-mail: alexatatsenko@ukr.net.

Olexandr Tatsenko – Senior Lecturer of the Department of Equipment Operation, Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine, ORCID: 0000-0003-1762-8219, e-mail: alexatatsenko@ukr.net.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Соларьов О. О., Мікуліна М. О., Таценко О. В. Розрахунок пропускної здатності автомобільного потоку на транспортній розв'язці. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2021. № 1 (7). С. 54-58. doi:10.20998/2413-4295.2021.01.08.

Please cite this article as:

Solarov O., Mikulina M., Tatsenko O. Calculation of car traffic capacity at the crossroad. *Bulletin of the National Technical University "KhPI"*. Series: New solutions in modern technology. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2021, no. 1 (7), pp. 54-58, doi:10.20998/2413-4295.2021.01.08.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Соларев А. А., Микулина М. А., Таценко А. В. Расчет пропускной способности автомобильного потока на транспортной развязке. *Вестник Национального технического университета «ХПИ»*. Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». 2021. № 1 (7). С. 54-58. doi:10.20998/2413-4295.2021.01.08.

АННОТАЦИЯ Пропускная способность участка дороги является ключевым элементом и зависит от многих факторов, таких как: ширина проезжей части, допустимой видимости, уклонов, радиусов поворотов, состав автомобилей, возможности маневров и конструкции автомобилей. Развитие автомобилестроения приводит к улучшению эксплуатационных возможностей автомобилей и улучшению показателей пропускной способности. Изменение всех этих составляющих приводит к изменению пропускной способности. Состав транспортного потока при расчете пропускной способности является одним из ключевых факторов. Подвижной транспортный поток характеризуется составом в нем различных (по возрасту и назначению) транспортных средств. Получение и анализ алгоритма определения пропускной способности транспортного потока на определенном участке дороги (развязке). Сделан анализ существующего положения автомобиле-использования в Украине и выбор оптимального алгоритма для получения реальных данных потока на участке дороги. Основной задачей инженера при проектировании определенного участка дороги является обеспечение максимальной пропускной способности участка дороги. Максимальная пропускная способность достигается путем улучшения дорожного покрытия, расширение дорожного полотна (увеличение количества подвижных полос и установке соответствующих знаков), выделение реверсивных полос движения и установления реверсивных светофоров. При расчете пропускной способности необходимо учитывать взаимосвязь между автомобилями в потоке в различных дорожных условиях. Интервалы между автомобилями в потоке могут меняться даже при высокой интенсивности движения, что в свою очередь достаточно корректирует показатель пропускной способности. Достаточно существенно интервалы изменяются при появлении в потоке грузовых автомобилей, спецтехники, или автобусов.

Ключевые слова: автомобильный поток; пропускная способность; транспортный поток; транспортная развязка.

Надійшла (received) 19.02.2021

УДК 544.31

doi:10.20998/2413-4295.2021.01.09

СУБСОЛІДУСНА БУДОВА СИСТЕМИ $MgO - FeO - Al_2O_3$

**О. М. БОРИСЕНКО^{*1}, С. М. ЛОГВІНКОВ², Г. М. ШАБАНОВА¹, А. М. КОРОГОДСЬКА³,
М. М. ІВАШУРА⁴, А. А. ІВАШУРА²**

¹ кафедра технології кераміки, вогнетривів, скла та емалей, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, УКРАЇНА

² кафедра технологій і безпеки життєдіяльності, Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця, м. Харків, УКРАЇНА

³ кафедра загальної та неорганічної хімії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, УКРАЇНА

⁴ кафедра неорганічної та фізичної хімії, Національний фармацевтичний університет, м. Харків, УКРАЇНА

*e-mail: onborisenko@ukr.net

АНОТАЦІЯ Трикомпонентні системи складають фізико-хімічну основу більшості вогнетривких матеріалів і аналіз їх субсолідусної будови дозволяє досить точно спрогнозувати області складів з оптимальними властивостями, а також дати рекомендації за технологічними параметрами виробництва, спікання та експлуатації одержуваних матеріалів. В результаті проведеного термодинамічного аналізу системи $MgO - FeO - Al_2O_3$ встановлено, що розбиття системи на елементарні трикутники зазнає змін в двох температурних інтервалах: I – до температури 1141 К та II – вище температури 1141 К. Розрахунковими методами визначені геометро-топологічні характеристики субсолідусної будови системи $MgO - FeO - Al_2O_3$: площі елементарних трикутників, ступінь їх асиметрії, площа областей, в яких існують фази, ймовірність існування фаз в системі. Встановлено, що у всьому інтервалі температур існує досить протяжна концентраційна область шпінельних фаз: герциніт ($FeAl_2O_4$) – благородна шпінель ($MgAl_2O_4$). Причому, периклаз (MgO) співіснує одночасно з обома шпінелями лише в низькотемпературній області. Це вказує, що під час отримання периклазошпінельних вогнетривів з підвищеною термостійкістю важливим технологічним параметром є швидкість охолодження нижче 1141 К. Для отримання периклазошпінельних вогнетривів з розгалуженою мікротріщинуватою структурою за рахунок відмінностей коефіцієнтів термічного розширення периклаза, герциніта й благородної шпінелі, – найбільш раціональна концентраційна область досліджуваної системи, що є спільною для двох елементарних трикутників ($MgO - FeAl_2O_4 - MgAl_2O_4$ і $MgO - FeO - MgAl_2O_4$), які існують в різних температурних інтервалах. При високих температурах випадку елементарний трикутник $MgO - FeO - MgAl_2O_4$ має максимальну площу і мінімальний ступінь асиметрії, а при охолодженні утворюється $MgO - FeAl_2O_4 - MgAl_2O_4$ – досить значна за площею, але має високу ступінь асиметрії. Тому прогнозувати склади шихт для периклазошпінельних вогнетривів слід з високою точністю дозування і зі значним часом гомогенізації компонентів при змішуванні, так як концентраційна область спільна для обох вище зазначених елементарних трикутників значно скорочується. Таким чином, розбиття системи $MgO - FeO - Al_2O_3$ на елементарні трикутники і аналіз геометро-топологічних характеристик фаз системи дозволило вибрати в досліджуваній системі області складів, що володіють оптимальними властивостями для отримання шпінельвміщуючих матеріалів

Ключові слова: трикомпонентна система; субсолідусна будова; коннода; елементарний трикутник; геометро-топологічні характеристики; благородна шпінель; герциніт

SUBSOLIDUS STRUCTURE OF THE $MgO - FeO - Al_2O_3$ SYSTEM

**O. BORYSENKO^{1*}, S. LOGVINKOV², G. SHABANOVA¹, A. KOROHODSKA¹, M. IVASHURA³,
A. IVASHURA²**

¹ Department of Ceramics, Refractory Materials, Glass and Enamels Technology, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, UKRAINE

² Department of Technologies and Safety of Vital Activity, Simon Kuznets Kharkov National University of Economics, Kharkiv, UKRAINE

³ Department of General and Inorganic Chemistry, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, UKRAINE

⁴ Department of Inorganic and Physical Chemistry, National University of Pharmacy, Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT Three-component systems constitute the physicochemical basis of most refractory materials and the analysis of their subsolidus structure makes it possible to accurately predict the areas of compositions with optimal properties, as well as give recommendations on the technological parameters of production, sintering, and operation of the materials obtained. As a result of the carried out thermodynamic analysis of the $MgO - FeO - Al_2O_3$ system, it was found that the partition of the system into elementary triangles undergoes changes in two temperature ranges: I – up to a temperature of 1141 K and II – above a temperature of 1141 K. By calculation methods, the geometrical-topological characteristics of the subsolidus structure of the system are determined $MgO - FeO - Al_2O_3$: areas of elementary triangles, degree of their asymmetry, area of regions in which phases exist, probability of phase existence in the system. It has been established that, over the entire temperature range, there is a fairly extended concentration region of spinel phases: hercynite ($FeAl_2O_4$) – noble spinel ($MgAl_2O_4$). Moreover, periclase (MgO) coexists

simultaneously with both spinels only in the low-temperature region. This indicates that when obtaining periclase-spinel refractories with increased heat resistance, an important technological parameter is a cooling rate below 1141 K. To obtain periclase-spinel refractories with branched microcracking of the structure due to differences in the thermal expansion coefficients of periclase, hercynite and noble spinel, the most rational concentration region of the system under study is which is common for two elementary triangles ($MgO - FeAl_2O_4 - MgAl_2O_4$ and $MgO - FeO - MgAl_2O_4$) existing in different temperature ranges. At high firing temperatures, the elementary triangle $MgO - FeO - MgAl_2O_4$ has a maximum area and a minimum degree of asymmetry, and upon cooling, $MgO - FeAl_2O_4 - MgAl_2O_4$ is formed, which is quite large in area, but has a high degree of asymmetry. Therefore, the composition of the charge for periclase-spinel refractories should be predicted with a high dosage accuracy and with a significant homogenization time of the components during mixing, since the concentration region common for both of the above elementary triangles is significantly reduced. Thus, the division of the $MgO - FeO - Al_2O_3$ system into elementary triangles and the analysis of the geometrical-topological characteristics of the phases of the system made it possible to select in the system under study the range of compositions with optimal properties for obtaining spinel-containing materials.

Keywords: three-component system; subsolidus structure; connod; elementary triangle; geometrical-topological characteristics; noble spinel; hercynite

Вступ

В технології вогнетривів визначальною стадією виробництва є твердофазне спікання, що обумовлює особливу значущість інформації щодо субсолідусної будови діаграм стану фізико-хімічних систем, представлених набором компонентів відповідно до планованого фазового складу матеріалу [1]. Трикомпонентні системи складають фізико-хімічну основу більшості вогнетривких матеріалів і аналіз їх субсолідусної будови дозволяє досить точно спрогнозувати області складів з оптимальними властивостями, а також дати рекомендації щодо технологічних параметрів виробництва, спікання і експлуатації одержуваних матеріалів.

Бінарні системи, що входять до складу системи $MgO - FeO - Al_2O_3$ вивчені доволі повно. В системі $MgO - FeO$ утворюється безперервний ряд твердих розчинів, бінарних оксидних сполук не існує [2]. В системі $MgO - Al_2O_3$ магнезійна шпінель ($MgAl_2O_4$) є єдиною стабільною сполукою [3]. В системі $FeO - Al_2O_3$ єдиною стабільною сполукою є герциніт (алюмозалізіста шпінель – $FeAl_2O_4$) [4].

Систему $MgO - FeO - Al_2O_3$ найчастіше описують у складі різних багатокомпонентних систем, наприклад, автори [5-8]. В роботі [9] запропоновано субсолідусну будову системи $MgO - FeO - Al_2O_3$, але без пояснень.

Поєднання різних типів шпінелей в складі вогнетрива, алюмозалізістої та алюмомагнезійної, сприяє більш інтенсивному утворенню рівномірної павутинної мікропористої структури за рахунок різного термічного розширення цих шпінелей, і як наслідок підвищення його стійкості до одночасного впливу високотемпературних і механічних навантажень [10,11].

Мета роботи

Мета роботи – визначення розрахунковими методами геометро-топологічних характеристик субсолідусної будови системи $MgO - FeO - Al_2O_3$, їх аналіз і застосування в прогнозуванні раціональних концентраційних областей одержання периклазо-шпінельних вогнетривів з високою термостійкістю.

Виклад основного матеріалу

В результаті проведеного термодинамічного аналізу системи $MgO - FeO - Al_2O_3$ за методикою [12], авторами встановлено, що розбиття системи на елементарні трикутники зазнає змін у двох температурних інтервалах [13,14]:

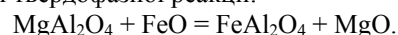
I – до температури 1141 К співіснують такі комбінації фаз: $MgO - FeO$, $MgO - FeAl_2O_4$, $FeO - FeAl_2O_4$, $FeAl_2O_4 - MgAl_2O_4$, $MgO - MgAl_2O_4$, $FeAl_2O_4 - Al_2O_3$, $MgAl_2O_4 - Al_2O_3$. Система розбивається на три елементарних трикутника: 1) $MgO - FeO - FeAl_2O_4$, 2) $MgO - FeAl_2O_4 - MgAl_2O_4$, 3) $FeAl_2O_4 - MgAl_2O_4 - Al_2O_3$;

II – вище температури 1141 К йде перебудова коннод: зникає коннода $MgO - FeAl_2O_4$ і з'являється – $FeO - MgAl_2O_4$, що вносить відповідні зміни до розділення системи на елементарні трикутники: 1) $MgO - FeO - MgAl_2O_4$, 2) $FeO - MgAl_2O_4 - FeAl_2O_4$, 3) $FeAl_2O_4 - MgAl_2O_4 - Al_2O_3$.

Результати розбиття системи $MgO - FeO - Al_2O_3$ на елементарні трикутники відповідає правилу Курнакова [3]: $X_I = 1 + 2 = 3$, $X_{II} = 1 + 2 = 3$.

Для характеристики субсолідусної будови системи $MgO - FeO - Al_2O_3$ проведений розрахунок довжин коннод, результати якого представлені в табл. 1.

З результатів табл. 1 видно, що у всьому інтервалі температур існує досить протяжна концентраційна область шпінельних фаз: герциніт ($FeAl_2O_4$) – благородна шпінель ($MgAl_2O_4$). Причому, периклаз (MgO) співіснує одночасно з обома шпінелями лише в низькотемпературній області. Це вказує, що при отриманні периклазошпінельних вогнетривів з підвищеною термостійкістю важливим технологічним параметром є швидкість охолодження нижче температур 1141 К, яка припускає розвиток оборотної твердофазної реакції:



При цьому слід вжити заходів, що запобігають легкому окисненню вугілля (F) в гематит (F') зі значним збільшенням об'єму, тобто в вихідній шихті весь FeO повинен знаходитися в задалегідь синтезованих фазах: у вигляді твердого розчину вугілля в периклазі або у вигляді герциніта.

Таблиця 1 – Довжини коннод системи

| № | Позначення коноди | L, % |
|-------------------------|---|------|
| до температури 1141 К | | |
| 1 | MgO – FeO | 1000 |
| 2 | MgO – FeAl ₂ O ₄ | 870 |
| 3 | MgO – MgAl ₂ O ₄ | 719 |
| 4 | FeO – FeAl ₂ O ₄ | 586 |
| 5 | FeAl ₂ O ₄ – Al ₂ O ₃ | 414 |
| 6 | FeAl ₂ O ₄ – MgAl ₂ O ₄ | 366 |
| 7 | MgAl ₂ O ₄ – Al ₂ O ₃ | 281 |
| вище температури 1141 К | | |
| 1 | MgO – FeO | 1000 |
| 2 | FeO – MgAl ₂ O ₄ | 893 |
| 3 | MgO – MgAl ₂ O ₄ | 719 |
| 4 | FeO – FeAl ₂ O ₄ | 586 |
| 5 | FeAl ₂ O ₄ – Al ₂ O ₃ | 414 |
| 6 | MgAl ₂ O ₄ – Al ₂ O ₃ | 281 |
| 7 | MgAl ₂ O ₄ – FeAl ₂ O ₄ | 165 |

Основні геометро-топологічні характеристики субсолідної будови системи та її фаз: площі елементарних трикутників, ступінь їх асиметрії (L_{max} / L_{min}), площа областей, в яких існують фази, ймовірність існування фаз, наведені в табл. 2, 3. Розрахунки виконані за методикою [9].

Таблиця 2 – Характеристика елементарних трикутників системи MgO – FeO – Al₂O₃

| № | Елементарний трикутник | Площа, % | Ступінь асиметрії |
|-------------------------|--|----------|-------------------|
| до температури 1141 К | | | |
| 1 | MgO – FeO – FeAl ₂ O ₄ | 586 | 1,706 |
| 2 | MgO – FeAl ₂ O ₄ – MgAl ₂ O ₄ | 298 | 2,377 |
| 3 | FeAl ₂ O ₄ – MgAl ₂ O ₄ – Al ₂ O ₃ | 116 | 1,473 |
| Σ | | 1000 | – |
| max | | 586 | 2,377 |
| min | | 116 | 1,473 |
| вище температури 1141 К | | | |
| 1 | MgO – FeO – MgAl ₂ O ₄ | 719 | 1,390 |
| 2 | FeO – MgAl ₂ O ₄ – FeAl ₂ O ₄ | 165 | 2,440 |
| 3 | FeAl ₂ O ₄ – MgAl ₂ O ₄ – Al ₂ O ₃ | 116 | 1,473 |
| Σ | | 1000 | – |
| max | | 719 | 2,440 |
| min | | 116 | 1,39 |

Аналіз отриманих результатів показав, що до температури 1141 К найбільшу площу має елементарний трикутник MgO – FeO – FeAl₂O₄, менша площа у елементарного трикутника MgO – FeAl₂O₄ – MgAl₂O₄ і у нього відзначається найбільша ступінь асиметрії (табл. 2). Найменшу площу має трикутник FeAl₂O₄ – MgAl₂O₄ – Al₂O₃, але у нього і

найменший ступінь асиметрії. До 1141 К герциніт FeAl₂O₄ має найбільшу ймовірність існування (0,333), який присутній у всіх елементарних трикутниках досліджуваної системи (табл. 3).

Таблиця 3 – Геометро-топологічні характеристики фаз системи

| Сполука | Зі скількома фазами співіснує | У скількох трикутниках існує | Площа існування, S _i , % | Ймовірність існування, ω |
|----------------------------------|-------------------------------|------------------------------|-------------------------------------|--------------------------|
| до температури 1141 К | | | | |
| MgO | 3 | 2 | 884 | 0,295 |
| Al ₂ O ₃ | 2 | 1 | 116 | 0,039 |
| FeO | 2 | 1 | 586 | 0,195 |
| FeAl ₂ O ₄ | 4 | 3 | 1000 | 0,333 |
| MgAl ₂ O ₄ | 3 | 2 | 414 | 0,138 |
| Σ | | | 3000 | 1 |
| max | | | 1000 | 0,333 |
| min | | | 116 | 0,039 |
| вище температури 1141 К | | | | |
| MgO | 2 | 1 | 719 | 0,239 |
| Al ₂ O ₃ | 2 | 1 | 116 | 0,039 |
| FeO | 3 | 2 | 884 | 0,295 |
| FeAl ₂ O ₄ | 3 | 2 | 281 | 0,094 |
| MgAl ₂ O ₄ | 4 | 3 | 1000 | 0,333 |
| Σ | | | 3000 | 1,000 |
| max | | | 1000 | 0,333 |
| min | | | 116 | 0,039 |

Вище температури 1141 К в результаті перебудови коннод змінюється розбиття системи на елементарні трикутники, при якому найбільшу площу має трикутник MgO – FeO – MgAl₂O₄ і найменший ступінь асиметрії. Елементарні трикутники FeO – MgAl₂O₄ – FeAl₂O₄ і FeAl₂O₄ – MgAl₂O₄ – Al₂O₃ (0,165 і 0,116 відповідно) приблизно рівні за площею, але елементарний трикутник FeO – MgAl₂O₄ – FeAl₂O₄ має найбільший ступінь асиметрії (табл. 2). Тут найбільшу ймовірність існування (0,333) має алюмомагнезійальна шпінель (MgAl₂O₄), яка присутня у всіх елементарних трикутниках системи (табл. 3).

Найбільш раціональною концентраційною областю досліджуваної системи для отримання периклазошпінельних вогнетривів з розгалуженою мікротріщинуватою структурою за рахунок відмінностей коефіцієнтів термічного розширення периклаза, герциніта та благородної шпінелі – є область, яка спільна для двох елементарних трикутників (MgO – FeAl₂O₄ – MgAl₂O₄ і MgO – FeO – MgAl₂O₄), існуючих в різних температурних інтервалах. При високих температурах випалу елементарний трикутник MgO – FeO – MgAl₂O₄ має максимальну площу і мінімальний ступінь асиметрії, а при охолодженні утворюється MgO – FeAl₂O₄ – MgAl₂O₄ – досить значна за площею, але має високий ступінь асиметрії. Тому прогнозувати склади шихт для периклазошпінельних вогнетривів слід з високою

точністю дозування і зі значним часом гомогенізації компонентів під час змішування, так як концентраційна область спільна для обох вище зазначених елементарних трикутників значно скорочується.

Висновки

Таким чином, розбиття системи $MgO - FeO - Al_2O_3$ на елементарні трикутники і аналіз геометро-топологічних характеристик фаз системи дозволило вибрати в досліджуваній системі області складів, що володіють оптимальними властивостями для отримання шпінельвміщуючих матеріалів.

Список літератури

1. Логвинков С. М., Борисенко О. Н., Цапко Н. С., Шабанова Г. Н., Корогодская А. Н., Шумейко В. Н., Гапонова Е. А. Расчетная оценка степени сложности субсолидусного строения трехкомпонентных физико-химических систем. *Вестник Национального технического университета «ХПИ». Серия: Химия, химическая технология и экология.* Харьков: НТУ «ХПИ», 2020. № 2 (4). С. 57–67. doi: 10.20998/2079-0821.2020.02.08.
2. Самойлова О. В., Макровец Л. А. Термодинамическое моделирование фазовых диаграмм оксидных систем $FeO - MgO$, $FeO - Cr_2O_3$, $MgO - Cr_2O_3$ и $FeO - MgO - Cr_2O_3$. *Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия».* 2019. Т. 19. № 1. С. 18–25. doi: 10.14529/met190102.
3. Бережной А. С. *Многокомпонентные системы окислов.* К.: Наук. думка, 1970. 544 с.
4. Jak E., Hayes P., Pelton A., Decterov S. Thermodynamic modelling of the $Al_2O_3 - CaO - FeO - Fe_2O_3 - PbO - SiO_2 - ZnO$ system with addition of K and Na with metallurgical applications. 2009. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/0804/0a0bc1ea0e1f5a0ca22d7b78e3ad3e2a191d.pdf> (дата звернення 15.01.2021).
5. Decterov S. A., Jung I.-H., Jak E., Kang Y.-B., Hayes P., Pelton A. D. Thermodynamic modelling of the $Al_2O_3 - CaO - CoO - CrO - Cr_2O_3 - FeO - Fe_2O_3 - MgO - MnO - NiO - SiO_2 - S$ system and applications in ferrous process metallurgy. *VII International Conference on Molten Slags Fluxes and Salts.* The South African Institute of Mining and Metallurgy, 2004. P. 839–850.
6. Rodolfo Arnaldo Montecinos de Almeida, Deisi Vieira, Wagner Viana Bielefeldt, Antonio Cesar Faria Vilela. MgO saturation analysis of $CaO - SiO_2 - FeO - MgO - Al_2O_3$ slag system. *Materials Research.* 2018. № 21 (1). P. e20170041. doi: 10.1590/1980-5373-mr-2017-0041.
7. Питак Я. Н., Песчанская В. В., Питак О. Я., Юзенко Н. А., Дубовис В. Г. Строение системы $CaO - MgO - Fe_2O_3 - Al_2O_3$ в области субсолидуса. *Збірник наукових праць ПАТ «УКРНДІ ВОГНЕТРИВІВ ІМ. А. С. БЕРЕЖНОГО».* 2013. № 113. С. 65–70.
8. Lv X.-M., Lv X.-W., Wang L.-W., Qiu J., Liu M. Viscosity and structure evolution of the $SiO_2 - MgO - FeO - CaO - Al_2O_3$ slag in ferronickel smelting process from laterite. *Journal of Mining and Metallurgy, Section B: Metallurgy.* 2017. № 53 (2). P. 147–154. doi: 10.2298/JMMB150911002L.
9. Бережной А. С. Физико-химическая характеристика и субсолидусное строение системы $MgO - FeO - Fe_2O_3 -$

- $Cr_2O_3 - Al_2O_3 - SiO_2$. *Сборник трудов УННО.* 1962. Вып. 6. С. 5–63.
10. Södje J., Uhlendorf S., Klischat H.-J. Aspects of Elastification Reactions in Basic Cement Kiln Bricks. *Refractories WORLDFORUM.* 2013. Vol. 5. Issue 4. P. 53–62.
 11. Geraldo Eduardo Gonçalves, Graziella Rajão Cota Pacheco, Modestino Alves de Moura Brito, Sérgio Luiz Cabral da Silva, Vanessa de Freitas Cunha Lins. Influence of magnesia in the infiltration of magnesia-spinel refractory bricks by different clinkers. *Rem: Rev. Esc. Minas.* 2015, Vol. 68. Issue. 4. P. 409–415. doi: 10.1590/0370-44672014680117.
 12. Логвинков С. М. *Твердофазные реакции обмена в технологии керамики: монография.* Харьков: ХНЭУ, 2013. 248 с.
 13. Борисенко О. М., Логвинков С. М., Остапенко І. А., Шабанова Г. М., Корогодська А. М., Івашура А.А. Термодинамічний аналіз системи $MgO - FeO - Al_2O_3$. *Фізико-хімічні проблеми в технології тугоплавких металевих і силікатних матеріалів. Тези доповідей Міжнародної науково-технічної конференції.* Харків: ДІСА ПЛЮС, 2020. С. 40–41.
 14. Борисенко О. М., Логвинков С. М., Шабанова Г. М., Корогодська А. М., Остапенко І. А., Івашура А.А. Термодинамічні дослідження в системі $MgO - FeO - Al_2O_3$. *Наукові дослідження з вогнетривів та технічної кераміки: збірник наукових праць.* 2020. № 120. С. 115–119. doi: 10.35857/2663-3566.120.10.

References (transliterated)

1. Logvinkov S. M., Borisenko O. N., Tsapko N. S., Shabanova G. N., Korogodskaya A. N., Shumejko V. N., Gaponova O. O. Raschetnaya otsenka stepeni slozhnosti subsolidusnogo stroeniya trekhkomponentnykh fiziko-khimicheskikh sistem [Calculated evaluation of the degree of subsolidus structure complexity of the physico-chemical three-component systems]. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Chemistry, Chemical Technology and Ecology.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2020, no. 2 (4), pp. 57–67, doi: 10.20998/2079-0821.2020.02.08.
2. Samoylova O. V., Makrovets L. A. Termodynamicheskoye modelirovaniye fazovykh diagramm oksidnykh sistem $FeO - MgO$, $FeO - Cr_2O_3$, $MgO - Cr_2O_3$ i $FeO - MgO - Cr_2O_3$ [Thermodynamic modeling of phase diagrams of oxide systems $FeO - MgO$, $FeO - Cr_2O_3$, $MgO - Cr_2O_3$ and $FeO - MgO - Cr_2O_3$]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy,* 2019, Vol. 19, no. 1, pp. 18–25, doi: 10.14529/met190102.
3. Berezhnoy A. S. *Mnogokomponentnyye sistemy okislov* [Multicomponent oxide systems], Kiyev. Nauk. dumka, 1970, 544 p.
4. Jak E., Hayes P., Pelton A., Decterov S. Thermodynamic modelling of the $Al_2O_3 - CaO - FeO - Fe_2O_3 - PbO - SiO_2 - ZnO$ system with addition of K and Na with metallurgical applications, 2009. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/0804/0a0bc1ea0e1f5a0ca22d7b78e3ad3e2a191d.pdf> (accessed 15.01.2021).
5. Decterov S. A., Jung I.-H., Jak E., Kang Y.-B., Hayes P., Pelton A. D. Thermodynamic modelling of the $Al_2O_3 - CaO - CoO - CrO - Cr_2O_3 - FeO - Fe_2O_3 - MgO - MnO - NiO - SiO_2 - S$ system and applications in ferrous process metallurgy. *VII International Conference on Molten Slags Fluxes and Salts.* The South African Institute of Mining and Metallurgy, 2004, pp. 839–850.

- Rodolfo Arnaldo Montecinos de Almeida, Deisi Vieira, Wagner Viana Bielefeldt, Antonio Cesar Faria Vilela. MgO saturation analysis of CaO – SiO₂ – FeO – MgO – Al₂O₃ slag system. *Materials Research*, 2018, no. 21 (1), pp. e20170041, doi: 10.1590/1980-5373-mr-2017-0041.
- Pytak Ya. N., Peschanskaya V. V., Pytak O. Ya., Yuzenko N. A., Dubovys V. H. Stroenye systemy CaO – MgO – Fe₂O₃ – Al₂O₃ v oblasti subsolydusa [The structure of the CaO – MgO – Fe₂O₃ – Al₂O₃ system in the region of the subsolidus]. *Collection of scientific papers of PJSC "The URIR named after A.S. Berezhnoy"*, 2013, no. 113, pp. 65–70.
- Lv X.-M., Lv X.-W., Wang L.-W., Qiu J., Liu M. Viscosity and structure evolution of the SiO₂ – MgO – FeO – CaO – Al₂O₃ slag in ferronickel smelting process from laterite. *Journal of Mining and Metallurgy, Section B: Metallurgy*, 2017, no. 53 (2), pp. 147–154, doi: 10.2298/JMMB150911002L.
- Berezhnoy A. S. Fiziko-khimicheskaya kharakteristika i subsolidusnoye stroynoye systemy MgO – FeO – Fe₂O₃ – Cr₂O₃ – Al₂O₃ – SiO₂ [Physico-chemical characteristics and subsolidus structure of MgO – FeO – Fe₂O₃ – Cr₂O₃ – Al₂O₃ – SiO₂ system]. *Sbornik trudov UNIO [Proceedings of the UNIO]*, 1962, Vol. 6, pp. 5–63.
- Södje J., Uhlendorf S., Klischat H.-J. Aspects of Elastification Reactions in Basic Cement Kiln Bricks. *Refractories WORLDFORUM*, 2013, no. 5 (4), pp. 53–62.
- Geraldo Eduardo Gonçalves, Graziella Rajão Cota Pacheco, Modestino Alves de Moura Brito, Sérgio Luiz Cabral da Silva, Vanessa de Freitas Cunha Lins. Influence of magnesia in the infiltration of magnesia-spinel refractory bricks by different clinkers. *Rem: Rev. Esc. Minas*, 2015, no. 68 (4), pp. 409–415, doi: 10.1590/0370-44672014680117.
- Logvinkov S. M. Tverdogaznyye reaktsii obmena v tekhnologii keramiki: monografiya [Solid-phase exchange reactions in ceramics technology: monograph], Kharkiv. KhNUE, 2013, 248 p.
- Borysenko O. M., Logvinkov S. M., Ostapenko I. A., Shabanova H. M., Korogodska A. M., Ivashura A.A. Termodynamichnyy analiz systemy MgO – FeO – Al₂O₃ [Thermodynamic analysis of the system MgO – FeO – Al₂O₃]. *Fizyko-khimichni problemy v tekhnolohiyi tuhoplavkykh nemetalevykh i sylikatnykh materialiv. Tezy dopovidey Mizhnarodnoyi naukovo-tekhnichnoyi konferentsiyi* [Physico-chemical problems in the technology of refractory non-metallic and silicate materials. Abstracts of reports of the International scientific and technical conference], Kharkiv. DISA PLYUS, 2020, pp. 40–41.
- Borysenko O. M., Logvinkov S. M., Shabanova G. M., Korohodska A. M., Ostapenko I. A., Ivashura A. A. Termodynamichni doslidzhennya v systemi MgO – FeO – Al₂O₃ [Thermodynamic studies in the MgO – FeO – Al₂O₃ system]. *Scientific research on refractories and technical ceramics: collection of scientific papers*, 2020, no. 120, pp. 115–119, doi: 10.35857/2663-3566.120.10.

Відомості про авторів (About authors)

Борисенко Оксана Миколаївна – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», докторант кафедри технології кераміки, вогнетривів, скла та емалей; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2746-6797>; e-mail: onborisenko@ukr.net.

Oksana Borysenko – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Doctoral Candidate, Department of Ceramics, Refractory Materials, Glass and Enamels Technology, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2746-6797>; e-mail: onborisenko@ukr.net.

Логвінков Сергій Михайлович – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця, професор кафедри технологій і безпеки життєдіяльності; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5957-2386>; e-mail: Sergii.Logvinkov@m.hneu.edu.ua.

Sergey Logvinkov – Doctor of Technical Sciences, Senior Research Officer, Professor, Department of Technologies and Safety of Vital Activity, Simon Kuznets Kharkov National University of Economics, Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5957-2386>; e-mail: Sergii.Logvinkov@m.hneu.edu.ua.

Шабанова Галина Миколаївна – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри технології кераміки, вогнетривів, скла та емалей; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7204-940X>; e-mail: gala-shabanova@ukr.net.

Galina Shabanova – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor, Department of Ceramics, Refractory Materials, Glass and Enamels Technology, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7204-940X>; e-mail: gala-shabanova@ukr.net.

Корогодська Алла Миколаївна – доктор технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри загальної та неорганічної хімії; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1534-2180>; e-mail: all-korogodskaya@ukr.net.

Alla Korohodska – Doctor of Technical Sciences, Docent, Department of General and Inorganic Chemistry, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1534-2180>; e-mail: all-korogodskaya@ukr.net.

Іващура Марина Миколаївна – кандидат сільськогосподарських наук, доцент, Національний фармацевтичний університет, доцент кафедри неорганічної та фізичної хімії; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3427-6024>; e-mail: ivashuramari@gmail.com.

Marina Ivashura – Candidate of Agricultural Sciences (Ph. D.), Docent, Docent, Department of Inorganic and Physical Chemistry, National University of Pharmacy, Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3427-6024>; e-mail: ivashuramari@gmail.com.

Іващура Андрій Анатолійович – кандидат сільськогосподарських наук, доцент, Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця, доцент кафедри технологій і безпеки життєдіяльності; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0022-7489>; e-mail: ivashura.a@ukr.net.

Andrii Ivashura – Candidate of Agricultural Sciences (Ph. D.), Docent, Associate Professor, Department of Technologies and Safety of Vital Activity, Simon Kuznets Kharkov National University of Economics, Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0022-7489>; e-mail: ivashura.a@ukr.net.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Борисенко О. М., Логвинков С. М., Шабанова Г. М., Корогодська А. М., Івашура М. М., Івашура А. А. Субсолідусна будова системи MgO – FeO – Al₂O₃. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2021. № 1 (7). С. 59-64. doi:10.20998/2413-4295.2021.01.09.

Please cite this article as:

Borysenko O., Logvinkov S., Shabanova G., Korohodska A., Ivashura M., Ivashura A. Subsolidus structure of the MgO – FeO – Al₂O₃ system. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2021, no. 1 (7), pp. 59-64, doi:10.20998/2413-4295.2021.01.09.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Борисенко О. Н., Логвинков С. М., Шабанова Г. Н., Корогодская А. Н., Ивашура М. Н., Ивашура А. А. Субсолидусное строение системы MgO – FeO – Al₂O₃. *Вестник Национального технического университета «ХПИ»*. Серія: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». 2021. № 1 (7). С. 59-64. doi:10.20998/2413-4295.2021.01.09.

АННОТАЦИЯ Трехкомпонентные системы составляют физико-химическую основу большинства огнеупорных материалов и анализ их субсолидусного строения позволяет достаточно точно спрогнозировать области составов с оптимальными свойствами, а также дать рекомендации по технологическим параметрам производства, спекания и эксплуатации получаемых материалов. В результате проведенного термодинамического анализа системы MgO – FeO – Al₂O₃ установлено, что разбиение системы на элементарные треугольники претерпевает изменения в двух температурных интервалах: I – до температуры 1141 К и II – выше температуры 1141 К. Расчетными методами определены геометро-топологические характеристики субсолидусного строения системы MgO – FeO – Al₂O₃: площади элементарных треугольников, степень их асимметрии, площадь областей, в которых существуют фазы, вероятность существования фаз в системе. Установлено, что во всем интервале температур существует достаточно протяженная концентрационная область шпинельных фаз: герцинит (FeAl₂O₄) – благородная шпинель (MgAl₂O₄). Причем, периклаз (MgO) сосуществует одновременно с обоими шпинелями лишь в низкотемпературной области. Это указывает, что при получении периклазошпинельных огнеупоров с повышенной термостойкостью важным технологическим параметром является скорость охлаждения ниже 1141 К. Для получения периклазошпинельных огнеупоров с разветвленной микротрещиноватостью структуры за счет различий коэффициентов термического расширения периклаза, герцинита и благородной шпинели, – наиболее рациональная концентрационная область исследуемой системы, являющаяся совместной для двух элементарных треугольников (MgO – FeAl₂O₄ – MgAl₂O₄ и MgO – FeO – MgAl₂O₄), существующих в различных температурных интервалах. При высоких температурах обжига элементарный треугольник MgO – FeO – MgAl₂O₄ имеет максимальную площадь и минимальную степень асимметрии, а при охлаждении образуется MgO – FeAl₂O₄ – MgAl₂O₄ – достаточно значительный по площади, но имеющий высокую степень асимметрии. Поэтому прогнозировать составы шихт для периклазошпинельных огнеупоров следует с высокой точностью дозирования и со значительным временем гомогенизации компонентов при смешении, так как концентрационная область совместная для обоих выше отмеченных элементарных треугольников значительно сокращается. Таким образом, разбиение системы MgO – FeO – Al₂O₃ на элементарные треугольники и анализ геометро-топологических характеристик фаз системы позволило выбрать в изучаемой системе области составов, обладающих оптимальными свойствами для получения шпинельсодержащих материалов.

Ключевые слова: трехкомпонентная система; субсолидусное строение; коннода; элементарный треугольник; геометро-топологические характеристики; благородная шпинель; герцинит

Надійшла (received) 10.02.2021

УДК 684.4.03

doi:10.20998/2413-4295.2021.01.10

ОБГРУНТУВАННЯ МОЖЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ТЕРМОМОДИФІКОВАНОГО ШПОНУ У СЕРЕДОВИЩІ З ПІДВИЩЕНОЮ ВОЛОГОЮ

О. Ю. ГОРБАЧОВА

кафедра технологій та дизайну виробів з деревини, Національний університет біоресурсів і природокористування України, Київ, УКРАЇНА
e-mail: gorbachova.sasha@ukr.net

АНОТАЦІЯ Термічно модифікована деревина широко застосовується в деревообробній промисловості, оскільки володіє підвищеною стійкістю до чинників зовнішнього середовища (вологість, температура). Вплив високої температури на деревину спричиняє зменшення адсорбції води за рахунок зменшення доступних вільних гідроксильних груп вуглеводів. Зменшення гігроскопічності сприяє стабільності розмірів обробленого матеріалу, оскільки набрякання та всихання в основному пов'язані з явищами поглинання та десорбції води. Дослідження природного вивітрювання завжди займає багато років. Тому для дослідження стійкості термомодифікованої деревини до впливу середовища застосовують штучне вивітрювання – моделювання зовнішніх факторів (циклічна зміна УФ-світла та вологи). Встановлено ефективність використання термомодифікованого шпону у якості личкувального шару фасадів меблевих виробів, що експлуатуються за різних температурно-вологісних умов середовища. Визначено величини волого- та водопоглинання на зразках дубового шпону, що попередньо пройшли процес термооброблення. Виявлено, що найбільше вологи із середовища зразки дубового шпону набрали у перші дві доби. У немодифікованого шпону маса збільшилася на 0,06 г, аналогічні результати показав шпон модифікований за температур 160 та 190 °С. У двічі менше за перші дві доби набрав термомодифікований шпон за температури 250 °С. До кінця експерименту (наступні 11 діб) зразки шпону звичайного та модифікованого за всіх температур увібрали стільки ж вологи. Немодифікований шпон і термомодифікований за температур 160 і 220 °С увібрали 50-66 % своєї початкової маси, а модифіковані за 250 °С – 20-36 %. Контрольні зразки шпону під час визначення водопоглинання набрали 98 % від початкової маси. Зразки модифіковані за 160 °С – 10, 20, 30 хв показали кращий результат – зменшення до 94 %, 93 % та 91 %. Спостерігається незначне покращення водопоглинання після впливу температури 220 °С упродовж 10, 20, 30 хв – 91 %, 91 % та 90 %. Значення на рівні 90 %, 89 % та 86 % зафіксовано у зразків шпону модифікованих за 250 °С.

Ключові слова: деревина; шпон; термічне модифікування; температурно-вологісні параметри; вологопоглинання; водопоглинання; стабільність розмірів

JUSTIFICATION OF THE POSSIBILITY OF USING THERMOMODIFIED VENEER IN AN ENVIRONMENT WITH HIGH HUMIDITY

О. HORBACHOVA

Department of Technology and Design of Wood Products, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, UKRAINE

ABSTRACT Thermally modified wood is widely used in the woodworking industry, as it has increased resistance to environmental factors (humidity, temperature). The effect of high temperature on wood causes a decrease in water adsorption by reducing the available free hydroxyl groups of carbohydrates. The reduction in hygroscopicity contributes to the treated material size stability, as swelling and shrinkage are mainly associated with the phenomena of absorption and water desorption. The study of natural weathering always takes many years. Therefore, to study the resistance of thermally modified wood to environmental influences, artificial weathering is used - modeling of external factors (cyclic change of UV light and moisture). The effectiveness of the thermally modified veneer use as a material for lining the furniture facades which working in different temperature and humidity conditions was established. The values of moisture and water absorption on the samples of oak veneer, which have previously undergone the heat treatment process, have been determined. It was found that the samples of oak veneer gained the most moisture from the environment in the first two days. The weight of unmodified veneer increased by 0.06 g, similar results showed veneer modified at temperatures of 160 and 190 °C. Thermally modified veneer at a temperature of 250 °C for the first two days gained twice less. By the end of the experiment (next 11 days), the samples of ordinary and modified veneer at all temperatures absorbed the same amount of moisture. Untreated veneer and thermally modified at temperatures of 160 and 220 °C absorbed 50-66 % of its initial weight, and modified at 250 °C – 20-36 %. Control samples of veneer during the determination of water absorption gained 98 % of the initial weight. Samples modified at 160 °C – 10, 20, 30 min showed the best result – reducing the value to 94 %, 93 % and 91 %. There is a slight improvement in water absorption after exposure to temperature 220 °C for 10, 20, 30 min – 91 %, 91 % and 90 %. Values water absorption at the level of 90 %, 89 % and 86 % were recorded in veneer samples modified at 250 °C.

Keywords: wood; veneer; thermal modification; temperature and humidity parameters; moisture absorption; water absorption; dimensional stability

Вступ

В меблевому виробництві та будівництві все більш інтенсивно ведеться пошук нових

високоєфективних засобів захисту деревини від руйнування. Але захист деревини сьогодні повинен не тільки підвищувати її експлуатаційні параметри довговічність, а й вирішувати екологічну безпеку.

Термічне оброблення широко застосовується в деревообробній промисловості, оскільки підвищує стійкість матеріалу до чинників зовнішнього середовища. Цей процес спричиняє зменшення адсорбції води за рахунок зменшення доступних вільних гідроксильних груп вуглеводів. В результаті зменшення гігроскопічності деревини сприяє стабільності розмірів обробленого матеріалу, оскільки набрякання та всихання в основному пов'язані з явищами поглинання та десорбції води [1]. Часто при модифікуванні деревини виникають труднощі щодо технологічних режимів її оброблення, зокрема тривалості та температури впливу. Тому процес модифікування може не досягти необхідного рівня, а застосування такої деревини призводить до її швидкого руйнування.

Дія на деревину високих температур змінює як зовнішній вигляд, так і хімічні властивості деревини. У деяких випадках термічна обробка може збільшити цінність матеріалу, імітуючи поверхню тропічних порід, які цінуються в багатьох країнах. Важливо розуміти основи процесу термомодифікування, щоб досягти бажаних змін властивостей деревини [2]. Тому знання фізичних, механічних та хімічних властивостей термомодифікованої деревини, показників її якості, механізму дії на матеріали температури, дає змогу здійснювати вибір з урахуванням економічних показників, тривалості і безпеки застосування, екологічних аспектів тощо [3].

Низький рівень витрат на технічне обслуговування, широка доступність та відносно просте виготовлення та монтаж сприяють зростанню популярності дерев'яних фасадів. Саме термомодифікована деревина стає одним з кращих матеріалів для облицювання будівельних конструкцій та виробів [4]. У зв'язку з цим проведено вимірювання вологості термічно модифікованих фасадів та виявлено її низький вміст в порівнянні з еталонною ялиною. Але не вказано, який був ступінь та режими модифікування деревини. Втрати маси, змочуваність, колір деревини та хімічні перетворення згодом були широко вивчені, тоді як необхідні додаткові дослідження, що зосереджуються на контролі якості, моделюванні та вивченні причин поліпшень властивостей модифікованої деревини [5,6].

Необхідні засоби для оцінки зміни якості з точки зору покращення цільових властивостей матеріалу під час промислового виробництва та під час експлуатації. Широке використання термічно модифікованої деревини призвело до необхідності контролю якості, що включає контроль відхилень продукції, що дозволяє здійснювати його третьою стороною в разі сертифікації та регулювання скарг і вимог споживачів [7]. Однак, не вказано, які необхідні методи для характеристики зміни якості з точки зору поліпшених цільових властивостей модифікованої деревини під час промислового виробництва.

Лабораторні випробування показали позитивний вплив термічної модифікації на довговічність, стабільність розмірів і теплопровідність деревини [8]. Результати моніторингу показали, що елементи і вікна з термічно модифікованої ялини мають значно нижчий вміст вологи в деревині в порівнянні з вікнами з немодифікованої, і що віск також позитивно впливає на показники вологості.

Природне старіння, як правило, є відносно повільним процесом, тому штучне старіння відіграє важливу роль в оцінці результатів роботи шляхом скорочення часу порівняно з природним вивітрюванням умови. Підхід полягає у захисті поверхні за допомогою різних видів комерційних продуктів, таких як розчинники, що містяться у воді, з високим вмістом твердих речовин, порошкові покриття та продукти, що не містять речовин [9].

Дослідження природного вивітрювання завжди займає багато років. Тому багато досліджень стійкості термомодифікованої деревини до впливу середовища проводять в штучно створених умовах. Тести на штучне вивітрювання, як правило, вважаються моделюванням зовнішніх умов, і включають лише цикли впливу УФ-світла та вологи. Досліджено ефекти прискореного вивітрювання чергуванням опромінення УФ-світлом та водяним розпилюванням на зміну кольору зразків сосни, бука і ялини [10]. На поверхні було нанесено 1, 2 або 3 шари коричневої акрилової захисної речовини Superwax. Найнижчу стійкість кольору, що оцінювалася в кольоровій системі CIE-L * a * b *, мала поверхня деревини букових зразків, що пофарбовані лише 1 шаром Superwax. Найвищу стійкість до зміни кольору мала ялина, пофарбована 3 шарами цього покриття.

Проведена оцінка зміни кольору і відбивної здатності дерев'яних поверхонь через штучне вивітрювання [11], отриманого за допомогою камери сонячного ящика, що імітує зовнішні умови і подальше вимивання води. Зі збільшенням часу вивітрювання необроблені поверхні зразків деревини темніють, тоді як модифіковані зразки світлішають, щоб мати схожий колір або, в будь-якому випадку, зменшувати хроматичну різницю, яка була на початку випробувань на атмосферостійкість.

Під час термічної обробки відбувається безліч хімічних реакцій, що призводять до змін в компонентах первинної клітинної стінки деревини і потемніння матеріалу. Серед інших змін, термомодифікована деревина, стає більш стійкою до грибкового розпаду і стабільніша за розмірами ніж необроблена, що робить його придатним для використання в приміщенні і на відкритому повітрі в якості облицювання, настилів, підлог, садових меблів та віконних рам [12].

В роботі [13] проведено дослідження набухання і шорсткості поверхні деревини після термообробки. Встановлено, що параметри набухання і шорсткості поверхні суттєво різнилися для двох

температур і двох тривалостей термообробки. Значення набухання і шорсткості поверхні зменшувалися зі збільшенням температури обробки і часу обробки, але не вказані за яких технологічних показників.

Одним з підходів є модифікація деревини – сукупність процесів, які надають обробленому матеріалу більше здатність справлятися з пошкодженнями, спричиненими зовнішнім середовищем, шляхом збільшення тривалості оброблення. Процес також виконується для посилення фізичних, механічних або естетичних властивостей деревини та похідні продукти з перевагою того, що не є шкідливими для користувачів та навколишнього середовища, як і натуральне дерево [14].

Таким чином, термічне модифікування деревини здатне надати їй можливості протистояти дії вологи. Тому розроблення технологічних заходів з модифікування деревини, дослідження волого- та водопоглинання є невирішеною складовою забезпечення стійкості деревини до перепаду умов середовища та визначають необхідність даного дослідження.

Мета роботи

Метою даної роботи є дослідження можливості використання термомодифікованого шпону для виготовлення виробів, що експлуатуються в умовах зміни вологи середовища, на основі встановлених величин волого- та водопоглинання матеріалу.

Матеріали і методи досліджень

Для встановлення ефективності використання термомодифікованого шпону у якості личкувального шару фасадів меблевих виробів, що експлуатуються за різних температурно-вологісних умов середовища, проведено дослідження величини волого- та водопоглинання. Використовували зразки дубового шпону, що попередньо пройшли процес термооброблення. Модифікування проводили у конвективній камері, для надійності результату шпон фіксували між пластинами з керамограніту. Загалом матеріал витримували за температур 160, 220, 250 °C упродовж 10, 20 та 30 хв. – рис. 1.

Для дослідження водопоглинання використовували зразки термомодифікованого шпону дубу із поверхнею тангентального перерізу товщиною 0,7 мм, розміром 155x15 мм. Величину водопоглинання визначали на зразках розмірами 155x150 мм, товщиною 0,7 мм, що пройшли попереднє термомодифікування за наведеними вище параметрами.

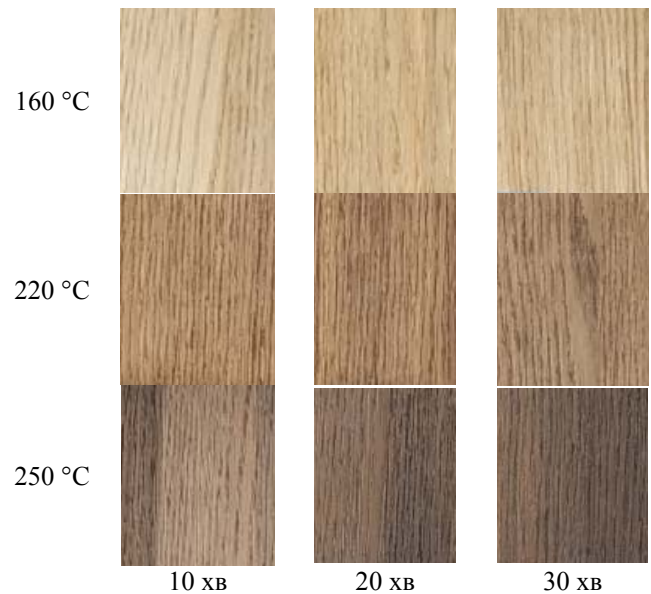


Рис. 1 – Дослідні зразки шпону модифікованого за умов різних режимних параметрів

Вологопоглинання деревини – здатність сухої деревини поглинати водяну пару. Вологопоглинання визначається як зміна маси під час витримання матеріалу у вологому середовищі певний час. Суть методу полягає в тому, що смужки термомодифікованого дубового шпону розміщували в ексікаторі (рис. 2) з насиченим розчином соди, яким просочували фільтрувальний папір для підвищення вологості середовища.



Рис. 2 – Проведення експерименту на водопоглинання

При дослідженні проводили періодичне зважування шпону у встановлений час – через 2, 3, 6, 9, 13 діб від моменту розміщення в ексікаторі.

Дослід завершували, коли різниця мас останніх зважувань не перевищувала 0,01г.

Вологопоглинання – здатність деревини поглинати воду при безпосередньому контакті з нею (рис. 2).



Рис. 3 – Дослід для визначення водопоглинання

Методикою дослідження передбачено встановлення шпону у касету, її занурення та витримку матеріалу у воді з періодичним зважуванням. Перше фіксування збільшення ваги проводили через 2 години, потім через 1, 2, 3, 6, 9 діб. Зважувати припиняли, коли різниця показів була не меншою ніж 0,05 г.

Обговорення результатів

Визначено, що найбільше води із середовища зразки дубового шпону набрали у перші дві доби (рис. 4).

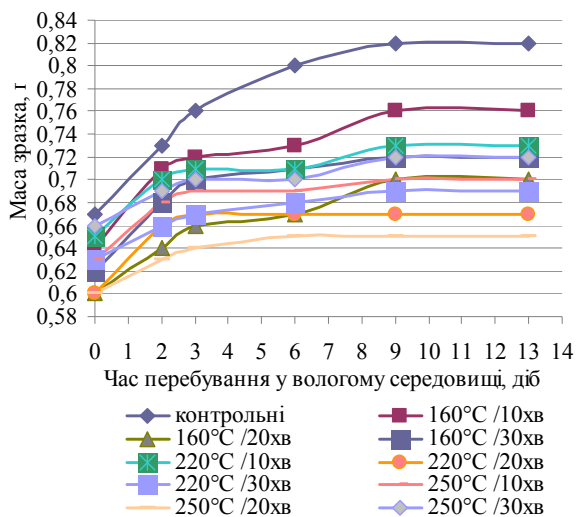


Рис. 4 – Динаміка збільшення маси зразків у вологому середовищі

У немодифікованого шпону маса збільшилася на 0,06 г, аналогічні результати показав шпон модифікований за нижчих температур. Термомодифікований шпон за температури 250 °C упродовж 20, 30 хв у перші дві доби набрав в 2 рази менше – 0,03 г. За наступні 11 діб контрольні зразки набрали ще 0,09 г, дещо менше зразки модифіковані за температури 160 °C, а модифіковані за 220 °C і вище не більше 0,03 г.

Результати досліджень вологопоглинання показали, що уже на 13-ту добу витримування у вологому середовищі маса усіх зразків не збільшувалася.

У порівнянні з немодифікованим шпоном (рис. 5), який за два тижні набрав 22,41 % води, шпон модифікований за 250 °C набрав в 2,5 рази менше води – в середньому 8,6 %.

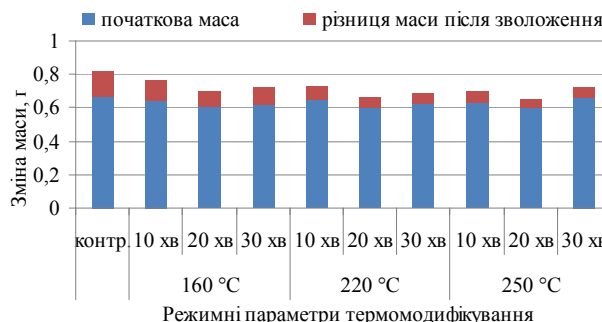


Рис. 5 – Результати вологопоглинання шпону різного ступеня модифікування

Дія високої температури також позитивно вплинула на зменшення величини водопоглинання шпону. Відповідно до результатів досліджень видно, що у перші дві години усі зразки набрали значну кількість води – табл. 1–3.

Таблиця 1 – Результати поглинання води необробленого та термомодифікованого шпону за 160 °C

| Експозиція у воді, діб | Зміна маси зразків після вимочування, г | | | |
|------------------------|---|--------------------------------|-------|-------|
| | Контрольні | Параметри режиму модифікування | | |
| | | 160 °C | | |
| | | 10 хв | 20 хв | 30 хв |
| 0 | 6,21 | 6,41 | 6,25 | 6,27 |
| 0,1 | 10,32 | 10,55 | 10,34 | 10,32 |
| 1 | 11,07 | 11,17 | 10,98 | 10,89 |
| 2 | 11,93 | 11,86 | 11,53 | 11,55 |
| 3 | 12,01 | 11,93 | 11,62 | 11,63 |
| 6 | 12,13 | 12,38 | 11,99 | 11,86 |
| 9 | 12,30 | 12,44 | 12,09 | 11,99 |
| Поглинута вода, % | 98 | 94,33 | 93,33 | 91,33 |

Так, немодифікований шпон і термомодифікований за температур 160 і 220 °C увібрали 50-66 % своєї початкової маси, а модифіковані за 250 °C – 20-36 %. Цікавим є характер набирання води у наступні дні під час продовження експерименту. Контрольні зразки шпону та модифікованого за нижчих температур із кожним наступним зважуванням показували менші значення. А от зразки модифіковані за температур 250 °C за

другу добу набрали практично стільки ж води як і за перші дві години, далі різниця зменшувалася.

Таблиця 2 – Результати поглинання води термомодифікованим шпоном за 190 °С

| Експозиція у воді, діб | Зміна маси зразків після вимочування, г | | |
|------------------------|---|-------|-------|
| | Тривалість модифікування, хв | | |
| | 10 | 20 | 30 |
| 0 | 6,07 | 6,14 | 6,14 |
| 0,1 | 9,32 | 9,56 | 9,34 |
| 1 | 10,18 | 10,43 | 10,28 |
| 2 | 11,09 | 11,29 | 11,23 |
| 3 | 11,19 | 11,22 | 11,22 |
| 6 | 11,48 | 11,58 | 11,58 |
| 9 | 11,59 | 11,70 | 11,66 |
| Поглинута волога, % | 91,33 | 90,67 | 89,67 |

Таблиця 3 – Результати поглинання води термомодифікованим шпоном за 220 °С

| Експозиція у воді, діб | Зміна маси зразків після вимочування, г | | |
|------------------------|---|-------|-------|
| | Тривалість модифікування, хв | | |
| | 10 | 20 | 30 |
| 0 | 5,85 | 5,97 | 5,87 |
| 0,1 | 7,62 | 8,14 | 7,61 |
| 1 | 8,52 | 9,16 | 8,48 |
| 2 | 10,17 | 10,7 | 10,12 |
| 3 | 10,34 | 10,8 | 10,34 |
| 6 | 10,9 | 11,14 | 10,81 |
| 9 | 11,14 | 11,27 | 10,93 |
| Поглинута волога, % | 90,33 | 89 | 86 |

Контрольні зразки шпону за весь експеримент набрали 98 % від початкової маси. Зразки, модифіковані за 160 °С – 10, 20, 30 хв, показали кращий результат – зменшення до 94 %, 93 % та 91 %. Спостерігається незначне покращення водопоглинання після впливу температури 220 °С упродовж 10, 20, 30 хв – 91 %, 91 % та 90 %. Значення на рівні 90 %, 89 % та 86 % зафіксовано у зразків шпону модифікованих за 250 °С.

Висновки

Таким чином, у результаті експериментальних досліджень встановлено позитивний вплив термічного модифікування шпону на водопоглинання. Встановлено, що із збільшенням температури модифікування до 250 °С, водопоглинання знижується понад двічі. Виявлено, що зразки не модифікованого шпону збільшили свою вологість на 22 %. Зразки, що модифікували за 160 °С упродовж

10, 20, 30 хв, поглинули 18 %, 16 % та 15 % вологи, відповідно. Модифікування за 250 °С – 10, 20, 30 хв сприяло зменшенню показника до 11 %, 9 % та 8 %. Термооброблення шпону за 250 °С сприяє зменшенню величини водопоглинання в середньому на 10 % порівняно із небробленим.

На основі отриманих результатів досліджень стає можливим розроблення ефективних режимних параметрів термічного модифікування деревини. Це дозволить ціленаправлено вирішувати подальші задачі розроблення технологічних процесів виготовлення виробів відповідно до умов їх експлуатації на різних об'єктах.

Список літератури

1. Candelier K., Thevenon M.-F., Petrissans A., Dumarcay S., Gerardin P., Petrissans M. Control of wood thermal treatment and its effects on decay resistance: a review. *Annals of Forest Science*. 2016. 73. P. 571–58. doi: 10.1007/s13595-016-0541-x.
2. Chen Y., Fan Y., Gao J., Stark N.M. The effect of heat treatment on the chemical and color change of black locust (*Robinia pseudoacacia*) wood flour. *Bioresources*. 2012. 7. P. 1157–1170.
3. Tsapko Yu., Horbachova O., Tsapko A., Mazurchuk S., Zavialov D., Buiskykh N. Establishing regularities in the propagation of phase transformation front during timber thermal modification. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. 1/10 (109). P. 30–36. doi: 10.15587/1729-4061.2021.2253104.
4. Humar M., Lesar B., Kržišnik D. Moisture Performance of Façade Elements Made of Thermally Modified Norway Spruce Wood. *Forests*. 2020. 11 (3). doi: 10.3390/f11030348.
5. Goli G., Todaro L. Wood Modification in Europe: Processes, Products, Applications. *GESAAF—University of Florence: Florence*. 2018. P. 41.
6. Brischke C., Lampen S. C. Resistance based moisture content measurements on native, modified and preservative treated wood. *European Journal of Wood and Wood Products*. 2014. 72 (2). P. 289-292. doi: 10.1007/s00107-013-0775-3.
7. Humar M., Repič R., Kržišnik D., Lesar B. Quality Control of Thermally Modified Timber Using Dynamic Vapor Sorption (DVS) Analysis. *Forests*. 2020. 11 (6). P. 666. doi: 10.3390/f11060666.
8. Ugovšek B., Šubic G., Starman J., Rep G., Humar M., Lesar B., Thaler N., Brischke C., Meyer-Veltrup L., Jones D., Häggström U., Lozano J.I. Short-term performance of wooden windows and facade elements made of thermally modified and non-modified Norway spruce in different natural environments. *Wood Material Science and Engineering*. 2019. 14. P. 42-47. doi: 10.1080/17480272.2018.1494627.
9. Bonifazi G., Serranti S., Capobianco G., Agresti G., Calienno L., Picchio R., Lo Monaco A., Santamaria U., Pelosi C. Hyperspectral imaging as a technique for investigating the effect of consolidating materials on wood. *Journal of Electronic Imaging*. 2017. 26 (1). 011003.
10. Slunská S., Reinprecht L. Colour stability of pine, beech and spruce wood treated with brown superwax coating at accelerated weathering in xenotest. *Acta facultatis*

- xylogologiae Zvolen*. 2015. 57(2). P. 61–69. doi: 10.17423/afx.2015.57.2.06.
11. Pelosi G., Agresti L., Lanteri R., Picchio E., Gennari E., Lo Monaco A. Artificial Weathering Effect on Surface of Heat-Treated Wood of Ayous (*Triplochitonscleroxylon* K. Shum). *Conference: The 1st International Electronic Conference on Forests (IECF)*. 2020.
 12. Ugovšek B., Šubic G., Humar M., Lesar B., Thaler N., Brischke C., Jones D., Lozano J. I. Performance of Windows and façade elements made of thermally modified Norway spruce (*Picea abies*) in different climatic condition. *In Proceedings of the WCTE 2016-World Conference on Timber Engineering*. 2016. doi: 10.1007/s11998-016-9871-8.
 13. Aytin S., Korkut P. Effect of thermal treatment on the swelling and surface roughness of common alder and wych elm wood. *Journal of Forestry Research*. 2016. 27(1). P. 225–229. doi: 10.1007/s11676-015-0136-7.
 14. Jones D., Sandberg D., Goli G., Todaro L. Wood Modification in Europe: a state of the art about processes, products and applications. *International, metadata CCO 1.0 Universal*, published by Firenze University Press. 2019.
 6. Brischke C., Lampen S. C. Resistance based moisture content measurements on native, modified and preservative treated wood. *European Journal of Wood and Wood Products*, 2014, 72 (2), pp. 289-292, doi: 10.1007/s00107-013-0775-3.
 7. Humar M., Repič R., Kržišnik D., Lesar B. Quality Control of Thermally Modified Timber Using Dynamic Vapor Sorption (DVS) Analysis. *Forests*, 2020, 11 (6), p. 666, doi: 10.3390/f11060666.
 8. Ugovšek B., Šubic G., Starman J., Rep G., Humar M., Lesar B., Thaler N., Brischke C., Meyer-Veltrup L., Jones D., Häggström U., Lozano J.I.. Short-term performance of wooden windows and facade elements made of thermally modified and non-modified Norway spruce in different natural environments. *Wood Material Science and Engineering*, 2019, 14, pp. 42-47, doi: 10.1080/17480272.2018.1494627.
 9. Bonifazi G., Serranti S., Capobianco G., Agresti G., Calienno L., Picchio R., Lo Monaco A., Santamaria U., Pelosi C. Hyperspectral imaging as a technique for investigating the effect of consolidating materials on wood. *Journal of Electronic Imaging*, 2017, 26 (1), 011003.
 10. Slunská S., Reinprecht L. Colour stability of pine, beech and spruce wood treated with brown superwax coating at accelerated weathering in xenotest. *Acta facultatis xylogologiae Zvolen*, 2015, 57(2), pp. 61–69, doi: 10.17423/afx.2015.57.2.06.

References (transliterated)

1. Candelier K., Thevenon M.-F., Petrissans A., Dumarcay S., Gerardin P., Petrissans M. Control of wood thermal treatment and its effects on decay resistance: a review. *Annals of Forest Science*, 2016, 73, pp. 571–58, doi:10.1007/s13595-016-0541-x.
2. Chen Y., Fan Y., Gao J., Stark N.M. The effect of heat treatment on the chemical and color change of black locust (*Robinia pseudoacacia*) wood flour. *Bioresources*, 2012, 7, pp. 1157–1170.
3. Tsapko Yu., Horbachova O., Tsapko A., Mazurchuk S., Zavialov D., Buislykh N. Establishing regularities in the propagation of phase transformation front during timber thermal modification. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2021, 1/10 (109), pp. 30–36, doi: 10.15587/1729-4061.2021.2253104.
4. Humar M., Lesar B., Kržišnik D. Moisture Performance of Façade Elements Made of Thermally Modified Norway Spruce Wood. *Forests*, 2020, 11 (3), doi: 10.3390/f11030348.
5. Goli G., Todaro L. Wood Modification in Europe: Processes, Products, Applications. *GESAAF—University of Florence: Florence*, 2018, p. 41.
11. Pelosi G., Agresti L., Lanteri R., Picchio E., Gennari E., Lo Monaco A. Artificial Weathering Effect on Surface of Heat-Treated Wood of Ayous (*Triplochitonscleroxylon* K. Shum). *Conference: The 1st International Electronic Conference on Forests (IECF)*, 2020.
12. Ugovšek B., Šubic G., Humar M., Lesar B., Thaler N., Brischke C., Jones D., Lozano J. I. Performance of Windows and façade elements made of thermally modified Norway spruce (*Picea abies*) in different climatic condition. *In Proceedings of the WCTE 2016-World Conference on Timber Engineering*, 2016. doi: 10.1007/s11998-016-9871-8.
13. Aytin S., Korkut P. Effect of thermal treatment on the swelling and surface roughness of common alder and wych elm wood. *Journal of Forestry Research*, 2016, 27(1), pp. 225–229, doi: 10.1007/s11676-015-0136-7.
14. Jones D., Sandberg D., Goli G., Todaro L. Wood Modification in Europe: a state of the art about processes, products and applications. *International, metadata CCO 1.0 Universal*, published by Firenze University Press, 2019.

Відомості про автора (About autor)

Горбачова Олександра Юрїївна – кандидат технічних наук, Національний університет біоресурсів і природокористування України, доцент кафедри технологій та дизайну виробів з деревини; м. Київ, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7533-5628>; e-mail: gorbachova.sasha@ukr.net.

Oleksandra Horbachova – PhD in Technical Sciences, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Associate Professor of Department of Technology and Design of Wood Products, Kyiv, Ukraine; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7533-5628>; e-mail: gorbachova.sasha@ukr.net.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Горбачова О. Ю. Обґрунтування можливості використання термомодифікованого шпону у середовищі з підвищеною вологою. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2021. № 1 (7). С. 65-71. doi:10.20998/2413-4295.2021.01.10.

Please cite this article as:

Horbachova O. Justification of the possibility of using thermomodified veneer in an environment with high moisture. *Bulletin of the National Technical University «KhPI». Series: New solutions in modern technology.* – Kharkiv: «NTU» KhPI, 2021, no. 1 (7), pp. 65-71, doi:10.20998/2413-4295.2021.01.10.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Горбачева А. Ю. Обоснование возможности использования термомодифицированного шпона в среде с повышенной влажностью. *Вестник Национального технического университета «ХПИ». Серия: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». 2021. № 1 (7). С. 65-71. doi:10.20998/2413-4295.2021.01.10.

АННОТАЦИЯ Термически модифицированная древесина широко применяется в деревообрабатывающей промышленности, так как обладает повышенной устойчивостью к факторам внешней среды (влажность, температура). Влияние высокой температуры на древесину приводит к уменьшению адсорбции воды за счет уменьшения свободных гидроксильных групп углеводов. Уменьшение гигроскопичности способствует стабильности размеров обработанного материала, поскольку набухание и усыхание в основном связаны с явлениями поглощения и десорбции воды. Исследование природного выветривания всегда занимает много лет. Поэтому для исследования устойчивости Термомодифицированная древесины к воздействию среды применяют искусственное выветривания - моделирование внешних факторов (циклическая смена УФ-света и влаги). Установлена эффективность использования термомодифицированного шпона в качестве облицовочного слоя фасадов мебельных изделий, эксплуатируемых при различных температурно-влажностных условиях среды. Определены величины влаго- и водопоглощения на образцах дубового шпона, которые предварительно прошли процесс термообработки. Выявлено, что большее количество влаги из среды образцы дубового шпона набрали в первые двое суток. Масса немодифицированного шпона увеличилась на 0,06 г, аналогичные результаты показал шпон модифицированный при температурах 160 и 190 °С. Термомодифицированный шпон при температуре 250 °С в первые двое суток набрал в два раза меньше. К концу эксперимента (следующие 11 суток) образцы шпона обычного и модифицированного при всех температурах вобрали столько же влаги. Немодифицированный и термомодифицированный при температурах 160 и 220 °С шпон поглотили 50-66 % своей первоначальной массы, а модифицированные при 250 °С – 20-36 %. Контрольные образцы шпона при определении водопоглощения набрали 98 % от начальной массы. Образцы модифицированные 160 °С – 10, 20, 30 мин показали лучший результат – уменьшение показателя до 94 %, 93 % и 91 %. Наблюдается незначительное улучшение водопоглощения после воздействия температуры 220 °С в течение 10, 20, 30 мин – 91 %, 91 % и 90 %. Значения на уровне 90 %, 89 % и 86 % зафиксировано у образцов шпона модифицированного при температуре 250 °С.

Ключевые слова: древесина; шпон; термическое модифицирование; температурно-влажностные параметры; влагопоглощение; водопоглощение; стабильность размеров

Надійшла(received) 01.03.2021

УДК 66.094.942

doi:10.20998/2413-4295.2021.01.11

ТРАНСЕСТЕРИФІКАЦІЯ ТРИГЛЦЕРИДІВ РОСЛИННИХ ОЛІЙ ГОЛОВНОЮ ФРАКЦІЄЮ ЕТИЛОВОГО СПИРТУ

Ю. Р. МЕЛЬНИК^{1*}, С. Р. МЕЛЬНИК¹, Г. Я. МАГОРІВСЬКА²

¹ кафедра технології органічних продуктів, Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, УКРАЇНА

² кафедра хімічної технології силікатів, Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, УКРАЇНА

*e-mail: yurii.r.melnyk@lpnu.ua

АНОТАЦІЯ Досліджено закономірності трансестерифікації тригліцеридів рослинних олій (соняшникової, ріпакової, лляної) головною фракцією етилового спирту в присутності каталізаторів – катіоніту КУ-2-8 у H⁺-формі та катіоніту КУ-2-8 із іммобілізованими іонами Cu²⁺ (необробленого та обробленого 0,1 М розчином гідроксиду натрію протягом 90 хв та 7 діб). Показано, що досліджені каталізатори, за винятком необробленого катіоніту КУ-2-8 із іммобілізованими іонами Cu²⁺, за умов реакції дозволяють досягнути конверсії тригліцеридів рослинних олій понад 90 %. Встановлено, що найвищу активність виявляє каталізатор КУ-2-8 із іммобілізованими іонами Cu²⁺, оброблений 0,1 М розчином гідроксиду натрію протягом 90 хв. Виявлено, що цей каталізатор дає змогу за 180 хв реакції досягнути конверсії тригліцеридів кожної з досліджених олій понад 99,5 %. Разом з тим встановлено, що у його присутності спостерігається найвища початкова швидкість реакції трансестерифікації. Також визначено закономірності впливу наведених каталізаторів на реакцію естерифікації вільних жирних кислот, присутніх в рослинних оліях, етиловим спиртом, наявним у головній фракції. Встановлено, що досліджені каталізатори по-різному впливають на реакцію естерифікації. Показано, що катіоніт КУ-2-8 із іммобілізованими іонами Cu²⁺, оброблений 0,1 М розчином гідроксиду натрію протягом 90 хв, каталізує реакцію естерифікації вільних жирних кислот усіх досліджених олій – їх конверсія становить від 21,6 % (у соняшниковій олії) до 74,1 % (у ріпаковій олії). Разом з тим встановлено, що тривала обробка катіоніту КУ-2-8 із іммобілізованими іонами Cu²⁺ розчином гідроксиду натрію призводить до різкого зниження або й втрати активності каталізатора в реакції естерифікації вільних жирних кислот етанолом, а його застосування в реакції трансестерифікації тригліцеридів ріпакової та соняшникової олій навіть зумовлює збільшення кислотного числа реакційної суміші, тобто частковий гідроліз тригліцеридів. Одержані результати досліджень показують, що одним із чинників, який дає змогу підвищити активність катіоніту КУ-2-8 із іммобілізованими іонами Cu²⁺ в процесі трансестерифікації рослинних олій етанолом головної фракції, є його нетривала обробка 0,1 М розчином лугу. Зроблено припущення, що така обробка впливає на каталітичну активність іонів Cu²⁺ внаслідок зміни електронної густини на катіоні каталізатора за рахунок координації на ньому частини ОН-аніонів. Максимальне насичення координаційної сфери катіону, досягнуте під час тривалої обробки катіоніту з іммобілізованими іонами Cu²⁺, очевидно зумовлює певні стеричні проблеми для доступу реагентів до каталізатора і знижує його активність.

Ключові слова: трансестерифікація; рослинні олії; головна фракція етилового спирту; катіоніт КУ-2-8; катіони міді (II)

TRANSESTERIFICATION OF VEGETABLE OILS' TRIGLYCERIDES BY THE HEAD FRACTION OF ETHYL ALCOHOL

Yu. MELNYK^{1*}, S. MELNYK¹, H. MAHORIVSKA²

¹ Department of Organic Products Technology, Lviv Polytechnic National University, Lviv, UKRAINE

² Department of Chemical Technology of Silicates, Lviv Polytechnic National University, Lviv, UKRAINE

ABSTRACT The regularities of sunflower, rapeseed and flaxseed oils' triglycerides transesterification by the head fraction of ethyl alcohol in the presence of various catalysts have been investigated. The cation exchange resin KU-2-8 in H⁺-form and cation exchange resin KU-2-8 containing an immobilized Cu²⁺-ions (untreated and treated by 0,1 M sodium hydroxide solution for 90 min and for 7 days) were used as catalyst. It was shown that the all investigated catalysts except the untreated cation exchange resin KU-2-8 containing an immobilized Cu²⁺-ions allow to achieve of triglycerides conversion over 90 % under the reaction conditions. It was found that the catalyst KU-2-8 containing an immobilized Cu²⁺-ions treated by 0.1 M sodium hydroxide solution for 90 min shows the highest activity. Also it was found that this catalyst allows to achieve triglyceride conversion all of studied vegetable oils over 99.5% in 180 min of reaction. Simultaneously it was found that the highest rate of transesterification reaction in its presence is observed. The influence of these catalysts on the esterification reaction of free fatty acids, present in vegetable oils, by ethyl alcohol, present in the head fraction, was studied. It was established that the influence of the investigated catalysts on the esterification reaction is different. It was shown that cation exchange resin KU-2-8 containing an immobilized Cu²⁺-ions treated by 0.1 M sodium hydroxide solution for 90 min catalyzes the esterification reaction of free fatty acids of all investigated oils. Their conversion is from 21.6 % (in sunflower oil) up to 74.1 % (in rapeseed oil). At the same time, it was found that long-term treatment of cation exchange resin KU-2-8 containing an immobilized Cu²⁺-ions by sodium hydroxide solution leads to a sharp decrease or loss of catalyst activity in the esterification reaction of free fatty acids by ethyl alcohol. It was shown that the use of this catalyst for the transesterification of rapeseed and sunflower oils' triglycerides even increases the acid number of the reaction mixture, namely to the partial hydrolysis of triglycerides. The obtained results show that the short-term treatment the cation exchange resin KU-2-8 containing an immobilized Cu²⁺-ions by 0.1 M alkali solution is one of the ways that allow to increase its catalytic activity in the transesterification process of

vegetable oils by head fraction of ethyl alcohol. It is assumed that such treatment affects the catalytic activity of Cu^{2+} -ions due to changes in the electron density on the catalyst cation caused the coordination of part of the OH^- -anions. The long-term treatment of the cation exchange resin containing an immobilized Cu^{2+} -ions by alkali solution causes a maximum saturation of the cation coordination sphere. This obviously creates steric problem of a reagents access to the catalyst and reduces the catalytic activity cation exchange resin.

Keywords: transesterification; vegetable oils; head fraction of ethyl alcohol; cation exchange resin KU-2-8; Cu^{2+} -ions

Вступ

Важливою задачею вдосконалення технології трансестерифікації тригліцеридів аліфатичними спиртами є пошук можливості використання як сировини відходів або побічних продуктів інших виробництв. Одним із таких видів сировини є головна фракція етилового спирту – побічний продукт одержання спирту-ректифікату.

Завдяки вмісту етанолу понад 90 мас. % головна фракція етилового спирту є потенційною сировиною для одержання етилових естерів вільних жирних кислот (ВЖК) за реакцією трансестерифікації з олією. Застосування головної фракції етилового спирту може знизити собівартість цільових продуктів процесу трансестерифікації рослинних олій. Проте, треба враховувати, що вказана сировина поряд із етанолом містить воду, що робить неможливим використання традиційних каталізаторів трансестерифікації [1].

Одним із напрямків пошуків ефективних каталізаторів трансестерифікації є дослідження гетерогенних каталізаторів [2,3].

У роботі [4] вивчено каталітичні властивості нанесеного в кількості 5 % на оксид кремнію карбонату калію. Встановлено, що за вмісту каталізатора в реакційній суміші 4 мас. %, мольного співвідношення метанол : тригліцериди пальмової олії – 20 : 1, температури 333 К вихід метилових естерів за 3 год реакції становить 98,1 %.

Застосуванням наночастинок Fe_3O_4 як носія для силікату натрію отримують ефективний каталізатор трансестерифікації бавовняної олії метанолом [5]. Показано, що за вмісту вказаного каталізатора в реакційній суміші 5 мас. %, температури реакції 60 °С та мольного співвідношення метанол : тригліцериди – 7 : 1 за 100 хв реакції досягають практично кількісного виходу метилових естерів – 99,6 %. Крім того, досліджений каталізатор зберігає високу активність при повторному застосуванні – після 7 циклів роботи він забезпечує вихід естерів понад 90%.

У літературі [6] описано застосування як гетерогенного каталізатора оксиду кальцію отриманого з відходів – шкарлупи курячих та страусових яєць, та виконано порівняння його каталітичних властивостей із гомогенними каталізаторами – гідроксидами натрію та калію. Показано, що такий гетерогенний каталізатор за його вмісту 1,5 мас. % дозволяє за температури 65 °С та мольного співвідношення метанол : тригліцериди – 10 : 1 досягнути виходу метилових естерів 97 % за 2 год. Проте, вказана активність є дещо нижчою, ніж активність гомогенних каталізаторів, які за такої

самої температури і мольного співвідношення метанол : тригліцериди 6 : 1 забезпечують вихід естерів 98 % за 1 год.

В роботі [7] досліджено гетерогенний каталізатор KF/CaO , модифікований перехідними металами (лантаном, церієм або цирконієм) у реакції трансестерифікації відпрацьованої рослинної олії метанолом. Показано, що за мольного співвідношення метанол : тригліцериди 12 : 1, вмісту каталізатора 4 мас. % і температури 65 °С вихід метилових естерів становить 98,7 %. Характерним є те, що вказаний каталізатор забезпечує вихід естерів понад 95 % навіть після 10 циклів застосування.

Оскільки гетерогенні каталізатори як правило виявляють нижчу активність, ніж традиційні гомогенні основні каталізатори, їх часто модифікують тим чи іншим методом. У роботі [8] досліджено застосування каталізаторів на основі лігніну, активованих фосфатною або сульфатною кислотою. Авторами показано, що вони дають змогу здійснювати трансестерифікацію олії ятрофи з високим вмістом вільних жирних кислот (кислотне число – 12 мг КОН/г олії) за один етап (одночасно з естерифікацією ВЖК) із високим виходом метилових естерів – 96,3 %.

Досліджено також промотування гетерогенних каталізаторів лужними компонентами. У роботі [9] показано, що промотування пористого $KAlSiO_4$ нітратом літію дозволяє здійснювати трансестерифікацію соєвої олії метанолом із виходом 100 %.

Наведені вище дані вказують, що модифікація різних гетерогенних каталізаторів за рахунок їх обробки добавками лужної чи кислотної природи, як правило, дозволяє підвищити вихід тригліцеридів.

Оскільки каталізатори на основі катіоніту КУ-2-8 із іммобілізованими іонами металів показали хороші результати під час трансестерифікації рослинних олій етанолом у присутності до 10 мас. % води, доцільно дослідити їх застосування в цьому процесі з використанням головної фракції виробництва спирту етилового ректифікованого [10]. Оскільки традиційними активними каталізаторами реакції трансестерифікації є гідроксиди або метилати натрію чи калію, можливим напрямком вдосконалення каталізаторів на основі КУ-2-8 із іммобілізованими іонами металів є їх обробка розчинами лугів [11].

Мета роботи

Метою досліджень було дослідження закономірностей процесу трансестерифікації

соняшникової, ріпакової та лляної олій побічним продуктом виробництва спирту-ректифікату – головною фракцією в присутності модифікованих гетерогенних каталізаторів на основі катіоніту КУ-2-8 та іммобілізованих іонів Cu^{2+} .

Виклад основного матеріалу

У процесі трансестерифікації використовували соняшкову (ДСТУ 4492:2005 Олія соняшникова. Технічні умови), лляну (ДСТУ ISO 150-2002 Олія лляна сира, рафінована і полімеризована для лаків і фарб. Технічні вимоги та методи випробування) та ріпакову (ДСТУ 8175:2015 Олія ріпакова. Технічні умови) олії, характеристики яких відповідали вказаним стандартам. Як джерело спирту використовували головну фракцію етилового спирту (ДСТУ 7402:2013 Фракція головна етилового спирту. Технічні умови), яка містила 90,8 мас. % етанолу.

Як каталізатор використовували:

- K0 – катіоніт КУ-2-8 у H^+ -формі;
- K1 – катіоніт КУ-2-8 із іммобілізованими іонами Cu^{2+} ;
- K2 – катіоніт КУ-2-8 із іммобілізованими іонами Cu^{2+} , оброблений надлишком 0,1 М розчину гідроксиду натрію протягом 90 хв;
- K3 – катіоніт КУ-2-8 із іммобілізованими іонами Cu^{2+} , оброблений надлишком 0,1 М розчину гідроксиду натрію протягом 7 діб.

Каталізатори K2 і K3 отримували відповідною обробкою каталізатора K1. Після завершення обробки каталізатор відфільтровували, промивали дистильованою водою до нейтрального значення рН промивної води та висушували на повітрі (рис. 1).

Трансестерифікацію тригліцеридів рослинних олій головною фракцією етилового спирту вели в установці, яка складалася з термостійкої круглодонної колби, куди завантажували реагенти в заданому співвідношенні та каталізатор, зворотного холодильника і термометра. Для нагрівання реакційної суміші використовували силіконову баню з магнітною мішалкою. Температура реакції становила 351 К. Через певні проміжки часу з реакційної суміші відбирали проби, в яких хроматографічно визначали вміст етанолу. У продуктах реакції визначали кислотне число [12].

Вміст етанолу в пробах реакційної суміші визначали за допомогою газорідного хроматографа ЛХМ-80 з детектором із теплопровідності. Для аналізу використовували колонку довжиною 1 м і діаметром 3 мм, заповнену фазою Silicone SE30, нанесеною на носій Chromaton N-AW у кількості 5 %. Як газ-носіє використовували гелій, витрата якого становила 3 $\text{дм}^3/\text{год}$, сила струму на детекторі – 120 мА, об'єм проби – 2 мкл. Температура випарника становила 483 К, колонки – 353 К, детектора – 443 К. Концентрацію етанолу визначали методом абсолютного калібрування [13].



a



б



в

Рис. 1 – Зовнішній вигляд необробленого (а) та обробленого розчином лугу протягом 90 хв (б) і 7 діб (в) катіоніту КУ-2-8 із іммобілізованими іонами Cu^{2+}

Перебіг процесу трансестерифікації рослинних олій наявним у головній фракції етиловим спиртом у присутності вищевказаних каталізаторів характеризували конверсією рослинної олії в перерахунку на тригліцерид, початковою швидкістю реакції трансестерифікації та кислотним числом продуктів реакції.

Конверсію тригліцериду розраховували в такій послідовності:

- за визначеною хроматографічно масовою часткою етанолу в пробі реакційної суміші та його початковою масою в реакційній суміші розраховували кількість прореагованого спирту:

$$n_{E,i} = \frac{m_{E,0} - \omega_{E,i} \cdot m_{PC}}{M_E}, \quad (1)$$

де $\omega_{E,i}$ – масова частка етанолу в реакційній суміші в i -й момент реакції; m_{PC} – маса реакційної суміші, г; $m_{E,0}$ – початкова маса етанолу в реакційній суміші, г; M_E – молярна маса етанолу, г/моль.

- конверсію тригліцериду з врахуванням його початкової кількості $n_{TG,0}$ визначали за рівнянням

$$K_{TG,i} = \frac{n_{E,i}}{3 \cdot n_{TG,0}} \cdot 100, \quad (2)$$

Конверсію ВЖК у реакційній суміші розраховували за формулою

$$K_{ВЖК} = \frac{KЧ_0 - KЧ_K}{KЧ_0} \cdot 100, \quad (3),$$

де $KЧ_0$ – сумарне кислотне число реакційної суміші на початку реакції, мг КОН; $KЧ_K$ – сумарне кислотне число реакційної суміші після завершення реакції, мг КОН.

Початкову швидкість реакції трансестерифікації визначали за формулою

$$r = \frac{n_{TG,0} - n_{TG,30}}{V_{PC} \cdot t}, \quad (4),$$

де $n_{TG,0}$ – початкова кількість тригліцеридів у реакційній суміші, моль; $n_{TG,30}$ – кількість тригліцеридів у реакційній суміші на 30 хв, моль; V_{PC} – об'єм реакційної суміші, дм^3 ; t – час, с.

Встановлено, що під час трансестерифікації тригліцеридів соняшникової олії етанолом найвищу активність виявляють катіоніт КУ-2-8 у H^+ -формі (K0) та катіоніт КУ-2-8 з іммобілізованими іонами Cu^{2+} , оброблений надлишком 0,1 М розчином гідроксиду натрію протягом 90 хв (K2). В їх присутності спостерігається практично повне перетворення тригліцеридів за 120 хв реакції (рис. 2).

У присутності каталізаторів K1 і K3 конверсія тригліцеридів соняшникової олії є нижчою і на 180 хв становить 85,6 % та 93,9 %, відповідно (рис. 2). Найнижча конверсія тригліцеридів на початку реакції спостерігається в присутності каталізатора K3 – близько 51,0 %, тоді як у присутності катіоніту КУ-2-

8 із іммобілізованими іонами Cu^{2+} (каталізатор K1) за той самий час вона становить майже 70 %. Проте вже після 90 хв у присутності каталізатора K3 конверсія є вищою, ніж у присутності каталізатора K1 і на 180 хв досягає 93,9 %, тоді як у присутності каталізатора K1 вона становить лише 85,6 %.

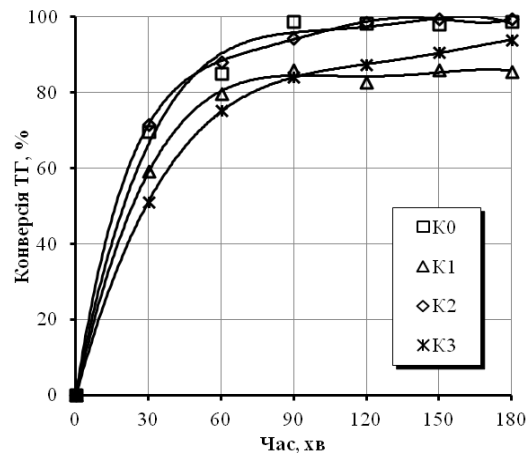


Рис. 2 – Вплив каталізатора на зміну конверсії тригліцеридів соняшникової олії в реакції їх трансестерифікації етанолом головної фракції. Температура – 351 К, мольне співвідношення тригліцериди : етанол – 1 : 4, вміст каталізатора – 2 мас. %

Трансестерифікація тригліцеридів лляної олії етанолом головної фракції відбувається повільніше, ніж при використанні як сировини тригліцеридів соняшникової олії. Встановлено, що найвищу активність, як і під час трансестерифікації тригліцеридів соняшникової олії, виявляє каталізатор – катіоніт КУ-2-8 із іммобілізованими іонами Cu^{2+} , оброблений надлишком 0,1 М розчину гідроксиду натрію протягом 90 хв (K2). У його присутності вже на 90 хв спостерігається практично повне перетворення тригліцеридів лляної олії, а на 180 хв реакції конверсія тригліцеридів становить 99,8%.

Реакція тригліцеридів лляної олії з етанолом головної фракції в присутності катіоніту КУ-2-8 у H^+ -формі (K0) і катіоніту КУ-2-8 з іммобілізованими іонами Cu^{2+} , обробленого надлишком 0,1 М розчину гідроксиду натрію протягом 7 діб (K3), відбувається істотно повільніше, особливо в початковий період. Так на 30 хв реакції конверсія тригліцеридів лляної олії в присутності каталізаторів K0 і K3 становить лише 44,5–46,9 %, тоді як у присутності каталізатора K2 вона досягає 70 %. Проте, до 180 хв реакції конверсія тригліцеридів зростає і досягає 97,7 % і 98,3 % для каталізаторів K0 і K3, відповідно (рис. 3).

У реакції трансестерифікації тригліцеридів ріпакової олії етанолом також найвищу активність виявляє каталізатор катіоніт КУ-2-8 з іммобілізованими іонами Cu^{2+} , оброблений надлишком 0,1 М розчину гідроксиду натрію протягом 90 хв (K2). У його присутності практично повна конверсія тригліцеридів досягається за 180 хв (рис. 4).

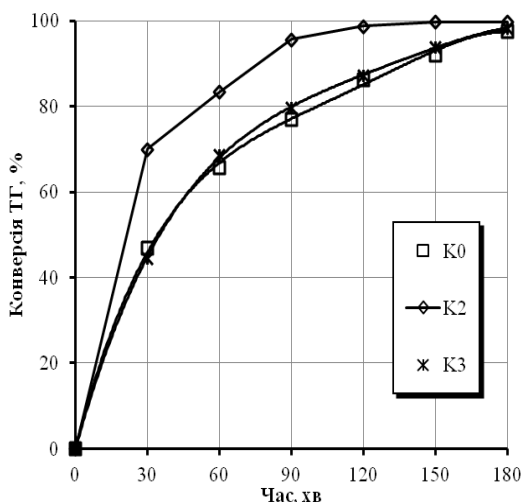


Рис. 3 – Вплив каталізатора на зміну конверсії тригліцеридів лляної олії в реакції їх трансестерифікації етанолом головної фракції. Температура – 351 К, мольне співвідношення тригліцериди : етанол – 1 : 4, вміст каталізатора – 2 мас. %

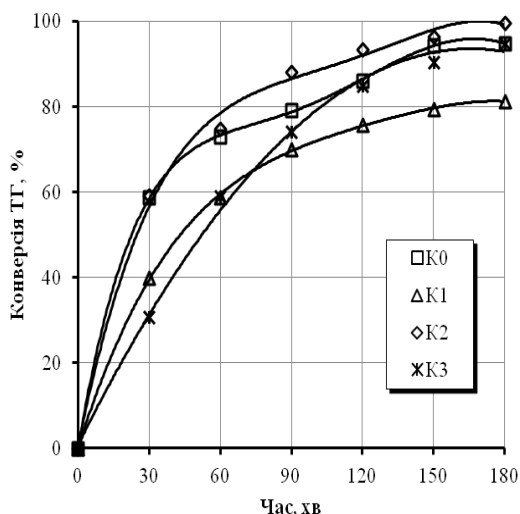


Рис. 4 – Вплив каталізатора на зміну конверсії тригліцеридів ріпакової олії в реакції їх трансестерифікації етанолом головної фракції. Температура – 351 К, мольне співвідношення тригліцериди : етанол – 1 : 4, вміст каталізатора – 2 мас. %

Найнижчу активність у реакції трансестерифікації тригліцеридів ріпакової олії етанолом головної фракції виявляє каталізатор K1: хоча в його присутності на 30 хв реакції спостерігається навіть дещо вища конверсія тригліцеридів, ніж у присутності каталізатора K3 (приблизно 40 % і 31 %, відповідно), проте на 180 хв реакції конверсія тригліцеридів у присутності каталізатора K1 становить лише приблизно 81 % (рис. 4).

У присутності каталізаторів K0 і K3 до 90 хв спостерігається різний характер зміни кривих залежності конверсії тригліцеридів ріпакової олії від часу – вища швидкість процесу була досягнута при використанні як каталізатора катіоніту КУ-2-8 у H⁺-формі. Проте з 90 хв до 180 хв характер зміни кривих залежності конверсії тригліцеридів від часу і конверсія тригліцеридів на 180 хв у присутності цих каталізаторів є практично ідентичною.

Обговорення результатів

Усі рослинні олії, використані в дослідженнях містили ВЖК, причому вміст їх у лляній і ріпаковій оліях був у 8–12 разів вищий, ніж у соняшниковій. Враховуючи можливість перебігу поряд із реакцією трансестерифікації естерифікації вказаних ВЖК етанолом визначали сумарне початкове і кінцеве число реакційної суміші.

Встановлено, що використання каталізатора K3 – катіоніту КУ-2-8 з іммобілізованими іонами Cu²⁺, обробленого надлишком 0,1 М розчину гідроксиду натрію протягом 7 діб, – незначно впливає на конверсію ВЖК рослинних олій (лляна олія) або, навпаки, сприяє гідролізу тригліцеридів до ВЖК (ріпакова та соняшникова олії), про що свідчить зростання сумарного кислотного числа суміші (табл. 1). Застосування каталізатора K2 – катіоніту КУ-2-8 з іммобілізованими іонами Cu²⁺, обробленого надлишком 0,1 М розчину гідроксиду натрію протягом 90 хв, – забезпечує конверсію ВЖК в межах 21,6–36,1 % під час трансестерифікації соняшникової та лляної олії і 74,1 % під час трансестерифікації ріпакової олії (табл. 1). Таким чином, каталізатор, який виявляє найвищу активність у реакції трансестерифікації тригліцеридів рослинних олій, одночасно дозволяє ефективно здійснювати естерифікацію ВЖК, присутніх у жировій сировині.

За результатами досліджень встановлено, що початкова швидкість реакції трансестерифікації тригліцеридів соняшникової олії етанолом головної фракції найвища в присутності каталізаторів K0 і K2. Найнижча початкова швидкість реакції спостерігається в присутності катіоніту КУ-2-8 із іммобілізованими іонами Cu²⁺, обробленого надлишком 0,1 М розчину гідроксиду натрію протягом 7 діб. Вона на 28,8 % нижча, ніж початкова швидкість реакції трансестерифікації в присутності катіоніту КУ-2-8 у H⁺-формі (табл. 1).

За впливом на значення початкової швидкості реакції трансестерифікації тригліцеридів соняшникової олії досліджені каталізатори можна розташувати у такий ряд активності:

$$K0 \approx K2 > K1 > K3.$$

Найвища початкова швидкість реакції трансестерифікації тригліцеридів лляної олії також спостерігається в присутності каталізатора K2. У присутності каталізаторів K0 і K3 вона практично однакова та на 33,3–35,2 % нижча (табл. 1). Початкова

швидкість реакції трансестерифікації тригліцеридів ріпакової олії етанолом головної фракції (табл. 1) змінюється в ряді, подібному до наведеного вище.

Таблиця 1 – Вплив каталізатора на технологічні показники процесу трансестерифікації тригліцеридів рослинних олій головною фракцією етилового спирту. Температура – 351 К, мольне співвідношення тригліцериди : етанол – 1 : 4, вміст каталізатора – 2 мас. %, час реакції 180 хв

| Каталізатор | Конверсія ТГ на 180 хв, % | Початкова швидкість реакції трансестерифікації, $\text{г} \cdot 10^4, \text{моль}/(\text{дм}^3 \cdot \text{с})$ | Конверсія ВЖК, % |
|------------------|---------------------------|---|------------------|
| Соняшникова олія | | | |
| K0 | 98,7 | 3,3 | – |
| K1 | 85,6 | 2,8 | – |
| K2 | 99,5 | 3,2 | 21,6 |
| K3 | 93,9 | 2,3 | – |
| Ляна олія | | | |
| K0 | 97,7 | 2,1 | 84,7 |
| K1 | – | – | – |
| K2 | 99,8 | 3,2 | 36,1 |
| K3 | 98,3 | 2,0 | 12,5 |
| Ріпакова олія | | | |
| K0 | 94,7 | 2,8 | – |
| K1 | 81,2 | 1,8 | – |
| K2 | 99,5 | 2,6 | 74,1 |
| K3 | 94,7 | 1,5 | – |

Отже, нетривала обробка 0,1 М розчином луку катіоніту КУ-2-8 із іммобілізованими іонами Cu^{2+} дає змогу підвищити його каталітичну активність в процесі трансестерифікації рослинних олій хоча, водночас, зменшує його активність як каталізатора естерифікації ВЖК лляної олії етанолом. Важливим є те, що після такої обробки каталізатор залишається ефективним для переробки сировини з високим вмістом води.

Вплив лужної обробки на каталітичну активність іонів Cu^{2+} очевидно можна пояснити утворенням ними координаційних сполук з аніонами OH^- . Про це свідчить зміна забарвлення катіоніту після його витримки протягом 90 хв і 7 діб у надлишку 0,1 М розчину гідроксиду натрію (рис. 1). Набуте катіонітом забарвлення є стійким і не змивається водою під час його промивання. Ймовірно, нетривала обробка каталізатора розчином луку змінює електронну густину на катіоні каталізатора за рахунок координації частини OH^- -аніонів на іонах Cu^{2+} . Максимальне насичення координаційної сфери катіону за рахунок тривалої обробки катіоніту з іммобілізованими іонами Cu^{2+} очевидно зумовлює певні стеричні проблеми для доступу реагентів до каталізатора і знижує його активність.

Висновки

Одержані результати досліджень показують, що катіоніт КУ-2-8 із іммобілізованими іонами Cu^{2+} , оброблений 0,1 М розчином луку, є ефективним каталізатором трансестерифікації соняшникової, лляної та ріпакової олій етанолом головної фракції виробництва спирту-ректифікату.

Одним із чинників, який дає змогу підвищити активність катіоніту КУ-2-8 із іммобілізованими іонами Cu^{2+} , є його нетривала обробка розчином луку, яка забезпечує високі швидкість реакції трансестерифікації та ступінь перетворення тригліцеридів. Показано, що найвищу активність з-поміж досліджених каталізаторів виявляє катіоніт КУ-2-8 з іммобілізованими іонами Cu^{2+} , оброблений надлишком 0,1 М розчину гідроксиду натрію протягом 90 хв.

Цей каталізатор також дає змогу одночасно здійснювати естерифікацію присутніх у ріпаковій олії ВЖК.

Загалом нетривала обробка розчином луку очевидно змінює електронну густину на катіоні каталізатора внаслідок координації частини OH^- -аніонів на іонах Cu^{2+} . Максимальне насичення координаційної сфери катіону за рахунок тривалої обробки катіоніту з іммобілізованими іонами Cu^{2+} очевидно зумовлює певні стеричні проблеми для доступу реагентів до каталізатора і знижує його активність.

Список літератури

1. Avhad M. R., Marchetti J. M. A review on recent advancement in catalytic materials for biodiesel production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015. № 50. P. 696–718. doi: 10.1016/j.rser.2015.05.038.
2. Kiss A., Dimian A., Rothenberg G. Solid Acid Catalysts for Biodiesel Production – Towards Sustainable Energy. *Adv. Synth. Catal.* 2006. № 348. P. 75–81. doi: 10.1002/adsc.200505160.
3. Zabeti M., Daud W. M. A. W., Aroua M. K. Activity of solid catalysts for biodiesel production: a review. *Fuel Process Technol.* 2009. № 90. P. 770–777. doi: 10.1016/j.fuproc.2009.03.010.
4. Irmawati R., Shafizah I., Nur Sharina A., Abastabar Ahangar H., Taufiq-Yap Y. H. Transesterification of Palm Oil by Using Silica Loaded Potassium Carbonate ($\text{K}_2\text{CO}_3/\text{SiO}_2$) Catalysts to Produce Fatty Acid Methyl Esters (FAME). *Energy and Power*. 2014. № 4 (1). P. 7–15. doi: 10.5923/j.ep.20140401.02.
5. Pingmei Guo, Fenghong Huang, Mingming Zheng, Wenlin Li, Qingde Huang. Magnetic Solid Base Catalysts for the Production of Biodiesel. *J. Am. Oil. Chem. Soc.* 2012. № 89. P. 925–933. doi: 10.1007/s11746-011-1979-5.
6. Tan Y. H., Abdullah M. O., Nolasco Hipolito C. Comparison of Biodiesel Production between Homogeneous and Heterogeneous Base Catalysts. *Applied Mechanics and Materials*. 2016. № 833. P. 71–77. doi: 10.4028/www.scientific.net/amm.833.71.
7. Lingmei Yang, Pengmei Lv, Zhongming Wang, Zhenhong Yuan, Wen Luo, Huiwen Li, Luo Yu, Hongzhe Sun.

- Promotional Effect of Transition Metal Doping on the Properties of KF/CaO Catalyst for Biodiesel Synthesis. *International Journal of Green Energy*. 2017. № 14(9). P. 784–791. doi: 10.1080/15435075.2017.1330752.
8. Fei-ling Pua, Zhen Fang, Sarani Zakaria, Feng Guo & Ching-hua Chia. Direct production of biodiesel from high-acid value Jatropha oil with solid acid catalyst derived from lignin. *Biotechnology for Biofuels*. 2011. № 4(56). doi: 10.1186/1754-6834-4-56.
 9. Rao Y., Zubaidha P., Reddy J., Kondhare D., Sushma D. Crystalline Manganese Carbonate a Green Catalyst for Biodiesel Production. *Green and Sustainable Chemistry*. 2012. № 2. P. 14–20. doi: 10.4236/gsc.2012.21003.
 10. Палюх З. Ю., Мельник, Ю. Р., Мельник С. Р. Вплив параметрів процесу на алкохоліз соняшникової олії етиловим спиртом. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. 2016. № 12(1184). С. 163–168. doi: 10.20998/2413-4295.2016.12.24.
 11. Van Gerpen J. Biodiesel processing and production. *Fuel Processing Technology*. 2005. № 86. P. 1097–1107. doi: 10.1016/j.fuproc.2004.11.005.
 12. Methodology for Lipids. URL: http://www.biocyclopedia.com/index/plant_protocols/lipids/Estimation_of_free_fatty_acids.php/ (дата звернення: 20.12.2020).
 13. Melnyk Yu., Melnyk S., Palyukh Z., Dzinyak B. Research into transesterification of triglycerides by aliphatic alcohols C₂–C₄ in the presence of ionites. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. № 1/6(94). P. 10–16. doi: 10.15587/1729-4061.2018.122938.
 4. Irmawati R., Shafizah I., Nur Sharina A., Abbastabar Ahangar H., Taufiq-Yap Y. H. Transesterification of Palm Oil by Using Silica Loaded Potassium Carbonate (K₂CO₃/SiO₂) Catalysts to Produce Fatty Acid Methyl Esters (FAME). *Energy and Power*, 2014, no. 4(1), pp. 7–15, doi: 10.5923/j.ep.20140401.02.
 5. Pingmei Guo, Fenghong Huang, Mingming Zheng, Wenlin Li, Qingde Huang. Magnetic Solid Base Catalysts for the Production of Biodiesel. *J. Am. Oil. Chem. Soc.*, 2012, no. 89, pp. 925–933, doi: 10.1007/s11746-011-1979-5.
 6. Tan Y. H., Abdullah M. O., Nolasco Hipolito C. Comparison of Biodiesel Production between Homogeneous and Heterogeneous Base Catalysts. *Applied Mechanics and Materials*, 2016, no. 833, pp. 71–77, doi: 10.4028/www.scientific.net/amm.833.71.
 7. Lingmei Yang, Pengmei Lv, Zhongming Wang, Zhenhong Yuan, Wen Luo, Huiwen Li, Luo Yu, Hongzhe Sun. Promotional Effect of Transition Metal Doping on the Properties of KF/CaO Catalyst for Biodiesel Synthesis. *International Journal of Green Energy*, 2017, no. 14(9), pp. 784–791, doi: 10.1080/15435075.2017.1330752.
 8. Fei-ling Pua, Zhen Fang, Sarani Zakaria, Feng Guo & Ching-hua Chia. Direct production of biodiesel from high-acid value Jatropha oil with solid acid catalyst derived from lignin. *Biotechnology for Biofuels*, 2011, no. 4(56), doi: 10.1186/1754-6834-4-56.
 9. Rao Y., Zubaidha P., Reddy J., Kondhare D., Sushma D. Crystalline Manganese Carbonate a Green Catalyst for Biodiesel Production. *Green and Sustainable Chemistry*, 2012, no. 2, pp. 14–20, doi: 10.4236/gsc.2012.21003.
 10. Palyukh Z., Melnyk Yu., Melnyk S. The effect of parameters on the transesterification process of sunflower oil with ethanol. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*. Kharkiv: NTU "KhPI", 2016, no. 12(1184), pp. 163–168. doi: 10.20998/2413-4295.2016.12.24.
 11. Van Gerpen J. Biodiesel processing and production. *Fuel Processing Technology*, 2005, no. 86, pp. 1097–1107, doi: 10.1016/j.fuproc.2004.11.005.
 12. Methodology for Lipids. Available at: http://www.biocyclopedia.com/index/plant_protocols/lipids/Estimation_of_free_fatty_acids.php/ (accessed 20.12.2020).
 13. Melnyk Yu., Melnyk S., Palyukh Z., Dzinyak B. Research into transesterification of triglycerides by aliphatic alcohols C₂–C₄ in the presence of ionites. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2018, no. 1/6(94), pp. 10–16, doi: 10.15587/1729-4061.2018.122938.

References (transliterated)

1. Avhad M. R., Marchetti J. M. A review on recent advancement in catalytic materials for biodiesel production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, no.50, pp. 696–718, doi: 10.1016/j.rser.2015.05.038.
2. Kiss A., Dimian A., Rothenberg G. Solid Acid Catalysts for Biodiesel Production – Towards Sustainable Energy. *Adv. Synth. Catal.*, 2006, no. 348, pp. 75–81, doi: 10.1002/adsc.200505160.
3. Zabeti M., Daud W. M. A. W., Aroua M. K. Activity of solid catalysts for biodiesel production: a review. *Fuel Process Technol.*, 2009, no. 90, pp. 770–777, doi: 10.1016/j.fuproc.2009.03.010.
4. Irmawati R., Shafizah I., Nur Sharina A., Abbastabar Ahangar H., Taufiq-Yap Y. H. Transesterification of Palm Oil by Using Silica Loaded Potassium Carbonate (K₂CO₃/SiO₂) Catalysts to Produce Fatty Acid Methyl Esters (FAME). *Energy and Power*, 2014, no. 4(1), pp. 7–15, doi: 10.5923/j.ep.20140401.02.
5. Pingmei Guo, Fenghong Huang, Mingming Zheng, Wenlin Li, Qingde Huang. Magnetic Solid Base Catalysts for the Production of Biodiesel. *J. Am. Oil. Chem. Soc.*, 2012, no. 89, pp. 925–933, doi: 10.1007/s11746-011-1979-5.
6. Tan Y. H., Abdullah M. O., Nolasco Hipolito C. Comparison of Biodiesel Production between Homogeneous and Heterogeneous Base Catalysts. *Applied Mechanics and Materials*, 2016, no. 833, pp. 71–77, doi: 10.4028/www.scientific.net/amm.833.71.
7. Lingmei Yang, Pengmei Lv, Zhongming Wang, Zhenhong Yuan, Wen Luo, Huiwen Li, Luo Yu, Hongzhe Sun. Promotional Effect of Transition Metal Doping on the Properties of KF/CaO Catalyst for Biodiesel Synthesis. *International Journal of Green Energy*, 2017, no. 14(9), pp. 784–791, doi: 10.1080/15435075.2017.1330752.
8. Fei-ling Pua, Zhen Fang, Sarani Zakaria, Feng Guo & Ching-hua Chia. Direct production of biodiesel from high-acid value Jatropha oil with solid acid catalyst derived from lignin. *Biotechnology for Biofuels*, 2011, no. 4(56), doi: 10.1186/1754-6834-4-56.
9. Rao Y., Zubaidha P., Reddy J., Kondhare D., Sushma D. Crystalline Manganese Carbonate a Green Catalyst for Biodiesel Production. *Green and Sustainable Chemistry*, 2012, no. 2, pp. 14–20, doi: 10.4236/gsc.2012.21003.
10. Palyukh Z., Melnyk Yu., Melnyk S. The effect of parameters on the transesterification process of sunflower oil with ethanol. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*. Kharkiv: NTU "KhPI", 2016, no. 12(1184), pp. 163–168. doi: 10.20998/2413-4295.2016.12.24.
11. Van Gerpen J. Biodiesel processing and production. *Fuel Processing Technology*, 2005, no. 86, pp. 1097–1107, doi: 10.1016/j.fuproc.2004.11.005.
12. Methodology for Lipids. Available at: http://www.biocyclopedia.com/index/plant_protocols/lipids/Estimation_of_free_fatty_acids.php/ (accessed 20.12.2020).
13. Melnyk Yu., Melnyk S., Palyukh Z., Dzinyak B. Research into transesterification of triglycerides by aliphatic alcohols C₂–C₄ in the presence of ionites. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2018, no. 1/6(94), pp. 10–16, doi: 10.15587/1729-4061.2018.122938.

Відомості про авторів (About authors)

Мельник Юрій Романович – кандидат технічних наук, доцент, Національний університет «Львівська політехніка», доцент кафедри технології органічних продуктів; тел.: (067) 391-09-20; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0109-5526>, e-mail: yurii.r.melnyk@lpnu.ua.

Yurii Melnyk – Candidate of Technical Sciences, Docent, Lviv Polytechnic National University, Associate Professor at the Department of Organic Products Technology; tel.: (067) 391-09-20; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0109-5526>, e-mail: yurii.r.melnyk@lpnu.ua.

Мельник Степан Романович – доктор технічних наук, професор, Національний університет «Львівська політехніка», професор кафедри технології органічних продуктів; тел.: (067) 391-29-77; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0629-9723>, e-mail: stepan.r.melnyk@lpnu.ua.

Stepan Melnyk – Doctor of Technical Sciences, Professor, Lviv Polytechnic National University, Professor at the Department of Organic Products Technology; tel.: (067) 391-29-77; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0629-9723>, e-mail: stepan.r.melnyk@lpnu.ua.

Магорівська Галина Ярославівна – кандидат технічних наук, Національний університет «Львівська політехніка», доцент кафедри хімічної технології силікатів; тел.: (067) 832-83-40; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3609-7970>, e-mail: halyna.y.mahorivska@lpnu.ua.

Halyna Mahorivska – Candidate of Technical Sciences, Lviv Polytechnic National University, Associate Professor at the Department of Chemical Technology of Silicate Materials; tel.: (067) 832-83-40; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3609-7970>, e-mail: halyna.y.mahorivska@lpnu.ua.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Мельник Ю. Р., Мельник С. Р., Магорівська Г. Я. Трансестерифікація тригліцеридів рослинних олій головною фракцією етилового спирту. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2021. № 1 (7). С. 72-79. doi:10.20998/2413-4295.2021.01.11.

Please cite this article as:

Melnyk Yu., Melnyk S., Mahorivska H. Transesterification of vegetable oils' triglycerides with the head fraction of ethyl alcohol. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2021, no. 1 (7), pp. 72-79, doi:10.20998/2413-4295.2021.01.11.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Мельник Ю. Р., Мельник С. Р., Магоривская Г. Я. Переэтерификация триглицеридов растительных масел головной фракцией этилового спирта. *Вестник Национального технического университета «ХПИ»*. Серія: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». 2021. № 1 (7). С. 72-79. doi:10.20998/2413-4295.2021.01.11.

АННОТАЦІЯ Исследованы закономерности переэтерификации триглицеридов растительных масел (подсолнечного, рапсового, льняного) головной фракцией этилового спирта в присутствии катализаторов – катионита КУ-2-8 в H^+ -форме и катионита КУ-2-8 с иммобилизованными катионами Ca^{2+} (необработанного и обработанного 0,1 М раствором гидроокиси натрия в течение 90 мин и 7 суток). Показано, что исследованные катализаторы, за исключением необработанного катионита КУ-2-8 с иммобилизованными катионами Ca^{2+} , в условиях реакции позволяют достичь конверсии триглицеридов растительных масел более 90 %. Установлено, что наивысшую активность проявляет катализатор КУ-2-8 с иммобилизованными катионами Ca^{2+} , обработанный 0,1 М раствором гидроокиси натрия в течение 90 мин. Выявлено, что этот катализатор позволяет за 180 мин реакции достичь конверсии триглицеридов каждого из исследованных масел более 99,5%. Вместе с тем установлено, что в его присутствии наблюдается самая высокая начальная скорость реакции переэтерификации. Также изучены закономерности влияния указанных катализаторов на реакцию этерификации свободных жирных кислот, присутствующих в растительных маслах, этиловым спиртом, который содержится в головной фракции. Установлено, что исследованные катализаторы по-разному влияют на реакцию этерификации. Показано, что катионит КУ-2-8 с иммобилизованными катионами Ca^{2+} , обработанный 0,1 М раствором гидроокиси натрия в течение 90 мин, катализирует реакцию этерификации свободных жирных кислот всех исследованных масел – их конверсия составляет от 21,6 % (в подсолнечном масле) до 74,1 % (в рапсовом масле). Также установлено, что длительная обработка катионита КУ-2-8 с иммобилизованными катионами Ca^{2+} раствором гидроокиси натрия приводит к резкому снижению или даже потере активности катализатора в реакции этерификации свободных жирных кислот этанолом, а его применение в реакции переэтерификации триглицеридов рапсового и подсолнечного масел даже ведет к увеличению кислотного числа реакционной смеси, то есть к частичному гидролизу триглицеридов. Полученные результаты исследований показывают, что одним из факторов, который позволяет повысить активность катионита КУ-2-8 с иммобилизованными ионами Ca^{2+} в процессе переэтерификации растительных масел этанолом головной фракции, является его непродолжительная обработка 0,1 М раствором щелочи. Сделано предположение, что такая обработка влияет на каталитическую активность ионов Ca^{2+} в результате изменения электронной плотности на катионе катализатора за счет координации на нем части ОН-анионов. Максимальное насыщение координационной сферы катиона, достигнутое в ходе длительной обработки катионита с иммобилизованными ионами Ca^{2+} , очевидно вызывает определенные стерические проблемы для доступа реагентов к катализатору и снижает его активность.

Ключевые слова: переэтерификация; растительные масла; головная фракция этилового спирта, катионит КУ-2-8; катионы меди (II)

Надійшла (received) 08.02.2021

УДК 502.1/504.5

doi:10.20998/2413-4295.2021.01.12

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ПЕРЕРОБЛЕННЯ ПЛАСТИКОВИХ ВІДХОДІВ

Є. О. МИХАЙЛОВА^{1*}, Д. М. ДЕЙНЕКА², Г. М. ПАНЧЕВА³

^{1*} кафедра технологій і безпеки життєдіяльності, Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця, м. Харків, УКРАЇНА

² кафедра хімічної технології неорганічних речовин, каталізу та екології, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, УКРАЇНА

³ кафедра охорони праці та навколишнього середовища, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, УКРАЇНА

* e-mail: mykhailova.e@ukr.net

АНОТАЦІЯ Розглянуто способи поводження з пластиковими відходами, кількість яких постійно зростає через високий попит на полімерну продукцію, що має високі експлуатаційні властивості. Актуальність проблеми обумовлена довговічністю пластику, який, потрапивши у довкілля, поступово деградує з утворенням речовин небезпечних для живих організмів. Найбільш поширеними способами поводження з пластиковими відходами є їх складування на спеціально відведених земельних ділянках або спалення з / без отримання тепла. Кожен з цих способів має певні недоліки, що викликає необхідність впровадження інших заходів. Перспективним з екологічної та економічної точок зору способом поводження з пластиковими відходами може бути їх перероблення у вторинну сировину, енергію або продукцію з певними споживчими властивостями. Мета даної роботи полягає у проведенні аналізу методів перероблення пластикових відходів, встановлення їх переваг і недоліків, визначення оптимальних підходів для утилізації полімерних матеріалів з різними властивостями. Розглянуто дві основні групи методів перероблення полімерів: фізичні та хімічні. До фізичного перероблення відносять механічний рециклінг, який базується на фізичному подрібненні пластикових відходів з отриманням вторинної сировини без суттєвої зміни хімічної структури матеріалу. Цей процес достатньо простий з точки зору технічного оформлення, але вимагає ретельного сортування і очищення відходів, а також має обмеження щодо повторного застосування переробленого матеріалу. Хімічне перероблення відбувається шляхом проведення процесів сольволізу (гідролізу, гліколізу, метанолізу) та конверсії (піролізу, газифікації). В цьому випадку пластикові відходи розкладаються на вихідні молекули – мономери, з яких знову можна виготовити полімерний продукт з тими ж властивостями. Хімічні методи дозволяють утилізувати невідсортовані та забруднені полімерні матеріали багато разів без втрати їх якості. Таким чином, впровадження описаних методів дозволить зменшити кількість відходів, перетворити їх на цінну вторинну сировину та скоротити використання природних ресурсів, що застосовуються для отримання первинних пластикових матеріалів.

Ключові слова: пластик; відходи; механічний рециклінг; сольволиз; піролиз; газифікація

ANALYSIS OF PLASTIC WASTE RECYCLING METHODS

E. MYKHAILOVA¹, D. DEINEKA², H. PANCHEVA³

¹ Department of Technologies and Safety of Vital Activity, Simon Kuznets Kharkov National University of Economics, Kharkiv, UKRAINE

² Department of Chemical Technology of Inorganic Substances, Catalysis and Ecology, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, UKRAINE

³ Department of Labour and Environment Protection, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT Methods of plastic waste management, the amount of which is constantly growing due to the high demand for polymer products with high performance properties, are considered. The urgency of the problem is explained by longevity of plastic, which, once in the environment, gradually degrades with the formation of substances dangerous to living organisms. The most common ways of plastic waste management are its storage on specially designated land plots or incineration with / without getting heat. Each of these methods has certain disadvantages, which necessitates the introduction of other measures. Recycling of plastic waste into secondary raw materials, energy or products with certain consumer properties can be the promising method of plastic waste management from ecological and economic points of view. The purpose of this work is to analyze the methods of plastic waste recycling, to establish their advantages and disadvantages, to determine the optimal ways for the disposal of polymeric materials with different properties. Two main groups of polymer recycling methods: physical and chemical, are considered. Physical method includes mechanical recycling, which is based on the physical grinding of plastic waste to obtain secondary raw materials without significant changes in the chemical structure of the material. This process is quite simple in terms of technical design, but requires careful sorting and cleaning of waste, and has limitations on the reuse of recycled material. Chemical recycling takes place through the processes of solvolysis (hydrolysis, glycolysis, alcoholysis) and conversion (pyrolysis, gasification). In this case, the plastic waste decomposes into the original molecules – monomers, from which it is possible to get a polymer product with the same properties. Chemical methods allow disposing of unsorted and contaminated polymeric materials many times without losing their quality. Thus, the introduction of the described methods will reduce the amount of plastic waste, turn them into valuable secondary raw materials and reduce using of natural resources used to obtain primary plastic materials.

Keywords: plastic; waste; mechanical recycling; solvolysis; pyrolysis; gasification

Вступ

Характерною особливістю сучасного світу є споживання людиною широкого спектру товарів,

об'єми виробництва яких постійно збільшуються. Ця тенденція стосується й різноманітних виробів з полімерних матеріалів, зокрема і синтетичного

походження. Пластмаси мають безліч переваг. Вони міцні, герметичні, гнучкі і, що не менш важливо, довговічні. Порівняна дешевизна та високі експлуатаційні властивості роблять пластик дуже популярним. На теперішній час цей матеріал використовується практично скрізь і для всього. Синтетичні полімери в багатьох сферах життя і діяльності людини витіснили більш дорогу сировину – натуральне дерево, скло та метал. Однак, переваги пластику швидко перетворюються в недоліки, коли мова йде про завершення життєвого циклу продукту. За оцінкою науковців середній час розкладання пластмас, вироблених за різними технологіями, коливається від 450 років до нескінченності [1].

Широке розповсюдження пластикових виробів призвело до виникнення серйозної екологічної проблеми, пов'язаної з їх знешкодженням після закінчення терміну експлуатації. За даними [2] щороку в усьому світі виробляється понад 420 млн. т синтетичних полімерів. Більше однієї чверті цієї кількості використовується для виготовлення виробів одноразового призначення, після чого вони викидаються. Авторами [3] визначено, що станом на 2015 р. на планеті утворилось майже 6,3 млрд. т пластикових відходів, з яких близько 9 % було перероблено, 12 % спалено, а 79 % захоронено на полігонах твердих побутових відходів (ТПВ) або накопичено у доквіллі.

Традиційним способом поводження з відпрацьованим пластиком є його розміщення на полігонах ТПВ. Це споруди, які обладнані системою захисту для запобігання негативного впливу продуктів розкладання відходів на довкілля та здоров'я людей. Таким чином, у звичайних умовах полігони є умовно безпечними, але з економічної точки зору неефективними, оскільки займають великі земельні площі та потребують певних витрат на їх експлуатацію. Також слід зауважити, що ці об'єкти можуть створюють довгострокові екологічні ризики забруднення повітря, ґрунтів та підземних вод продуктами руйнування полімерів.

Під впливом різних факторів (температури, ультрафіолетового випромінювання, хімічних сполук, контактування з рідинами або іншими предметами тощо) пластикові вироби повільно розпадаються на невеликі фрагменти – мікропластик (частинки пластику з розміром менше 5 мм). Мікропластик, який знаходиться у доквіллі, може виділяти у повітря та воду токсичні речовини, що використовуються при його виробництві: фталати, бісфенол А і полібромований дифеніловий ефір, роблячи їх доступними для прямого або непрямого впливу на живі організми [4].

За даними науковців [5] мікропластик, який потрапляє в організм людини під час проковтування з їжею та водою або вдихання, може потенційно призвести до серйозних ускладнень у стані його здоров'я, призводячи до запалення, окислювального стресу, нейродегенеративних захворювань, інсульту,

діабету, ревматоїдного артриту, серцево-судинних захворювань, запалень кишківника тощо.

Інший достатньо поширений спосіб знешкодження полімерних відходів полягає в їх термічній обробці (з/без отримання енергії) на сміттєспалювальних підприємствах. Такі об'єкти вимагають значних капітальних та експлуатаційних витрат, а також висококваліфікованих спеціалістів для управління технологічним процесом через їх високу потенційну екологічну небезпеку. Спалювання пластику призводить до вивільнення значної кількості карбон (IV) оксиду, водяної пари, токсичних газів (карбон (II) оксиду, оксидів нітрогену, ацетальдегіду, ацетону, бензолу, толуолу, ксилолу, бензальдегіду, формальдегіду, саліцилальдегіду, фосгену, діоксинів, фуранів, соляної кислоти тощо) та утворенню зольного залишку, що містить важкі метали (свинець і ртуть) [6]. Токсини від викидів, летюча зола і шлак можуть забруднювати повітря, а далі переміщуючись на великі відстані, накопичуватися в ґрунті і воді, а згодом потрапляти в організм людини по харчовим ланцюгам. Хоча фахівці стверджують, що сучасні сміттєспалювальні заводи є високоавтоматизованими і автоматизованими підприємствами, які оснащені ефективним очисним обладнанням та складними приладами контролю забруднення повітря для забезпечення екологічної безпеки викидів [7].

Перспективним з екологічної та економічної точок зору способом поводження з пластиковими відходами може бути їх перероблення, тобто перетворення відпрацьованих полімерів у вторинну сировину, енергію або продукцію з певними споживчими властивостями. Такий підхід має певні переваги: зниження ступеня забрудненості довкілля через зменшення обсягів утворення полімерних відходів та викидів карбон (IV) оксиду, який утворюється під час виробництва первинного пластику; ресурсозбереження, а саме скорочення використання вуглеводнів, води та електроенергії, що використовуються для отримання пластикових матеріалів; отримання додаткової продукції, тепла та енергії для інших галузей промисловості.

Отже, актуальність проблеми утворення, накопичення у доквіллі та утилізації відпрацьованих синтетичних полімерів в Україні та світі спонукає проведення наукових досліджень в цій галузі.

Мета роботи

Аналіз методів перероблення пластикових відходів, встановлення їх переваг і недоліків, визначення оптимальних підходів для утилізації полімерних матеріалів з різними властивостями.

Виклад основного матеріалу

Більшість видів пластмас можна переробляти, однак ступінь цього буде залежати від технічних, економічних та логістичних факторів. Особливості

вибору методу перероблення обумовлені тим, що синтетичні полімери мають різний хімічний склад, структуру, а отже, і властивості. Це, в свою чергу, впливає на технологічну можливість перероблення пластмас після закінчення строку їх використання. Деякі полімери виходять з ладу і руйнуються під час механічного або термічного впливу, що обмежує їх здатність до перероблення. Крім того, багато пластикових виробів можуть складатися з декількох типів полімерів (відомі як ламіновані пластмаси), що робить їх такими, що важко переробляти [4]. Таким чином, переробка різних видів відпрацьованого пластику буде відрізнятися за фізико-хімічними основами процесу та типом обладнання, що для цього використовується. Також певна складність полягає в тому, щоб правильно відсортувати і ретельно очистити відходи. Робиться це з тієї причини, що деякі види полімерів несумісні, а забруднення можуть значно вплинути на процес перероблення і якість отриманого вторинного матеріалу.

Зараз у світі використовується сім груп пластикових полімерів, кожна з яких має певні властивості. Кожну групу можна ідентифікувати за її пластиковим ідентифікаційним кодом (англ. plastic identification code, PIC), як правило, цифрою (від 1 до 7) та аббревіатурою за назвою полімеру. PIC був введений у 1988 р. в США Спілкою пластикової промисловості (англ. Society of the Plastics Industry, SPI) для забезпечення єдиної системи ідентифікації різних типів полімерів як допомога компаніям, які займаються переробленням пластикових відходів.

Універсальним знаком маркування різних видів полімерів є трикутник, який складається зі стрілок, в середині якого знаходиться код PIC. Буквенна аббревіатура під трикутниками позначає тип пластикового матеріалу. Цей знак належить до екологічного маркування II типу [8], який відноситься до інформативного декларування і вказує на певну екологічну характеристику, яка може бути корисною під час експлуатації чи утилізації продукції. Таке маркування не потребує обов'язкового оцінювання екологічної характеристики незалежною третьою стороною, тобто сертифікації, але виробник, який застосовує цей тип маркування, повинен мати можливість надати інформацію зацікавленій стороні щодо вимог і методів її перевірки.

Виробники пластикових виробів обов'язково або добровільно (залежно від законодавства країни або регіону) повинні використовувати екологічне маркування для своєї продукції. В свою чергу, споживачі можуть ідентифікувати тип пластику на основі кодів, які зазвичай знаходяться біля основи або збоку пластикових виробів, включаючи тару, контейнери та упаковку. Більшість споживачів припускають, що оскільки на полімерній продукції стоїть знак екологічного маркування (рис. 1, а), то її можна переробляти. Це відбувається через схожість знаку на пластикових виробках із символами переробки – «Стрічкою Мебіуса» (рис. 1, б), яка

також має вигляд трикутника зі стрілок, кожна з яких означає фазу замкнутого циклу «створення – застосування – утилізація» або іншими знаками (рис. 1, в), які вказують на можливе перероблення [9].



Рис. 1 – Знаки екологічного маркування: а – знак на пластику; б – «Стрічка Мебіуса»; в – інші знаки вторинного перероблення

Однак ASTM International (American Society for Testing and Materials) – міжнародна організація, що розробляє та публікує добровільні консенсусні технічні стандарти для широкого спектру матеріалів, товарів, систем та послуг, це заперечує. Використання PIC на пластиковому виробі не означає, що ця продукція переробляється або існують системи для її ефективної утилізації або повторного використання. З цієї причини ASTM International змінила символ. Для маркування пластику був затверджений трикутник з цільними межами, та переглянуті деякі стандарти попередньої кодифікації щодо товарів, які належать до кожної з категорій [10]. Детальна інформація про знаки маркування різних видів пластиків наведена в табл. 1.

В теперішній час виділяють дві групи методів перероблення полімерів: фізичні та хімічні (рис. 2).

Серед фізичних методів найбільш поширеним є механічний рециклінг. Цей метод базується на процесі фізичного подрібнення пластмас, що переробляються, з отриманням вторинної сировини або продукту без суттєвої зміни хімічної структури матеріалу. Практично усі відходи, що складаються з одного типу полімерів, можуть бути механічно перероблені з незначною або з повною відсутністю погіршення якості.

Механічна переробка відпрацьованих пластмас передбачає наступні стадії [11]:

- 1) сортування відходів за типом полімеру, кольором, станом матеріалу і ступенем забрудненості;
- 2) попереднє подрібнення відходів до крихти з розмірами 10–30 мм залежно від подальшого оброблення матеріалу;
- 3) повторне сортування, видалення різних домішок, в тому числі паперових етикеток, миття і сушіння матеріалу;
- 4) агломерація – спікання відмитої полімерної крихти в грудки невеликих розмірів;
- 5) гранулювання маси – виробництво гранул різної фракції з розплаву полімерної крихти в спеціальному обладнанні.

Таблиця 1 – Ідентифікаційні коди та характеристика різних типів полімерів

| Ідентифікаційний код і назва полімеру | Характеристика полімеру |
|---|--|
|  1 PET / PETE Поліетилен-терфталат | Підходить тільки для одноразового використання. Під час повторного використання можливе виділення фталатів |
|  2 PEHD / HDPE Поліетилен високого тиску | Відносно безпечний, хоча при певних обставинах виділяє формальдегід |
|  3 PVC / V Полівінілхлорид | Заборонений для харчового використання. Може містити бісфенол А, вінілхлорид, фталати, ртуть та / або кадмій |
|  4 PELD / LDPE Поліетилен низького тиску | Відносно безпечний для харчового використання. У рідких випадках виділяє формальдегід |
|  5 PP Поліпропілен | Відносно безпечний, хоча при певних обставинах виділяє формальдегід |
|  6 PS Полістирол | Підходить тільки для одноразового використання. Під час повторного використання можливе виділення стиролу |
|  7 OTHER Інші види пластика | Залежно від складу полімерів або їх комбінації можуть містити небезпечні речовини, або, навпаки, бути екологічно чистими матеріалами |

Ключовими стадіями в отриманні вторинного пластику високої якості є попереднє сортування відходів за видами полімерів та їх очищення від забруднень. Поділ змішаних пластикових відходів за типами проводять шляхом процесів флотації, аеросепарації, електросепарації, глибокого охолодження, різних хімічних методів. Під час відокремлення одного типу полімеру від іншого у воду або розчини додають поверхнево-активні речовини, які вибірково змінюють гідрофільні

властивості матеріалів. Іноді попереднє сортування важко виконувати технічно, особливо якщо пластмаси довго накопичувалися на звалищах. Отже, ці операції можуть частково виконуватися вручну, що значно уповільнює процес перероблення. Для ретельного очищення полімерної крихти від забруднень використовують гарячі або холодні розчини, що містять різні миючі засоби, тринатрійфосфат, каустичну соду, тетрахлоретилен [12].



Рис. 2 – Методи перероблення пластикових

Сучасні лінії механічного перероблення можуть утилізувати побутові і промислові полімерні відходи, виробничий брак і неліквіди, використану тару і упаковку. На виході можна отримати полімерну крихту – флекс (стадії 1–3), агломерат (стадії 1–4) або гранулят (стадії 1–5).

Флекс – це подрібнені на плоскі шматочки (пластівці) вироби з полімерних матеріалів, насамперед, ПЕТ (рис. 3). Така вторинна сировина в подальшому може перероблятися методами лиття під тиском і екструзії з отриманням продуктів: хімволокна (вторинного поліестеру), нетканого полотна й геосинтетика, ворсу для килимів і ковровіну, утеплювачів, щіток, пластикової тари для технічної рідини тощо. У даному випадку під час перероблення пластик не піддається плавленню і в ньому не протікають процеси розкладання. Отже, міцність та оптичні характеристики переробленого полімеру залишаються на первинному рівні [13].



Рис. 3 – ПЕТ-флекс

Технологія отримання флексу досить проста і не значно затратна фінансово. Найвигідніше

переробляти виробничий брак і відходи, які не піддавалися інтенсивній експлуатації. Більш складним і дорогим процесом є виробництво вторинного матеріалу з невідсортованих і сильно забруднених відходів.

Отриманий під час механічного рециклінгу агломерат також можна реалізовувати як вторинну сировину або гранулювати. Після грануляції полімерний матеріал стає більш однорідним, якісним і має велику насипну густину. Гранулят порівняно з агломератом можна реалізувати за вищою ціною.

Вторинна гранула – це проміжний продукт перероблення різних видів полімерів, який має задані розміри, колір і прозорість (рис. 4). Вид гранул, а також їх властивості та призначення, залежать від того, який полімер переробляється. Значна частина такої продукції припадає на [14]:

- поліетилентерфталат, який використовується для виготовлення пляшок технічного і побутового призначення, різної тари для продуктів харчування, косметичних засобів, хімії, покривельних матеріалів, пакувальних шпагатів і стрічок, технічних волокон;

- поліетилен низького тиску, з якого потім виготовляють м'які пакувальні матеріали (плівки і пакети), тверду упаковку (пробки для пляшок, тару для продуктів, косметики і хімії), полімерні труби, побутові ємності, сільськогосподарський і побутовий інвентар, деталі для різного устаткування, чорнила для 3D-принтерів;

- поліетилен високого тиску, який є вторинною сировиною для пакувальної плівки, підносів, лотків, пробок для скляних пляшок, дитячих іграшок, пластикової тари, покривельних матеріалів, полімерно-піщаних будматеріалів (плитки і черепиці), труб-каналів для кабелю, водостоків і вентиляції, виробів медичного призначення, утеплювача (пінополістиролу);

- поліпропілен використовується для отримання полімерних профілів, піддонів та підставок, легких меблів, конструкцій теплиць, труб, деталей обладнання, одноразових шприців, садового інвентарю, господарських речей (відер, тазиків, горщиків для квітів), пакувальної стрічки, плівки, пакетів, тканих мішків.

- полістирол, з якого виробляють канцелярські товари, побутові прилади, обладнання різного призначення, світлотехнічні вироби, будівельні матеріали для утеплення та облицювання, різноманітна тара та упаковка;

- полікарбонат використовується як вторинна сировина для виготовлення тепличних конструкцій, навісів, парканів, перегородок в приміщеннях, кухонного приладдя, комплектуючих для меблів, медичних товарів, окулярів, у приладобудуванні при виробництві деталей для точних приладів.

Узагалі механічно перероблений пластик використовується для виготовлення нових виробів: рідко – в чистому вигляді, часто – як добавка до первинної сировини для здешевлення продукції, якщо

це доцільно. Під час виробництва вторинної сировини зазвичай застосовуються різні добавки. Вони покращують фізичні та хімічні характеристики полімерів, а також їх експлуатаційні властивості. Для цього використовують барвники, ароматизатори, осушувачі, антистатики, спеціальні стабілізатори, поглиначі кислот і модифікатори в'язкості. Ці компоненти надають пластмасам, що переробляється, різноманітні кольори, запахи, міцність, стійкість до хімічних впливів, підвищують їх морозостійкість, захищають матеріал від деструкції.



Рис. 4 – Вторинні полімерні гранули

Пластик як вторинна сировина може перероблятися не більше 4–5 разів через термічний вплив під час перероблення, який погіршує властивості полімерів. Після останнього циклу, як правило, пластик знаходить застосування в будівництві доріг або вивозиться на полігони ТПВ.

До переваг механічного рециклінгу відносять порівняну простоту оформлення технологічного процесу та універсальність, оскільки він використовується для будь-яких видів полімерів. Крім того, при цьому не відбувається забруднення довкілля викидами шкідливих речовин. Недоліки методу полягають у високій енергоємності процесу, складності регулювання розмірів подрібнення, необхідності ретельного сортування і очищення відходів, що утилізуються, обмеженому повторному застосуванні переробленого матеріалу [12].

Серед фізичних методів також можна виділити радіаційний метод, який є перспективним для перероблення відпрацьованих пластмас, зокрема армованих пластиків. До цієї групи відносяться композити, що складаються з полімерної матриці у вигляді термореактивних і термопластичних полімерів, армованих волокнистими і листовими матеріалами зі скла, полімерів, базальту, вуглецю та інших матеріалів. Метод передбачає руйнування молекул полімерів під дією високоенергетичного випромінювання нейтронів, бета-частинок та гамма-випромінювань з утворенням низькомолекулярних продуктів.

Перевагою методу є його універсальність, оскільки під дією випромінювання руйнуються практично усі полімерні матриці з одночасним збереженням незмінними фізичних характеристик наповнювача, насамперед вуглецевих волокон. До недоліків треба віднести підвищене радіаційне

навантаження на людину і довкілля та можливість утилізації, в основному, відходів тонкошарових армованих пластмас [15].

Для пластикових відходів, які не можуть бути перероблені через технічні або економічні причини за допомогою фізичних методів, використовують хімічні технології. Відповідно Рамкової директиви ЄС про відходи [16] хімічне перероблення – це перетворення полімерних відходів зі зміною їх хімічної структури і утворенням речовин, які використовуються як продукт або сировина, виключаючи паливо та засоби для виробництва енергії. Під час хімічного перероблення полімерні відходи розкладаються на вихідні молекули – мономери, олігомери або їх суміш з іншими вуглеводнями, з яких потім знову можна виготовити пластикову продукцію з тими ж властивостями.

Серед хімічних методів утилізації пластмас виділяють процес сольволізу, який також називають хемолізом. Сутність методу полягає в розщепленні (деполімеризації) відходів полімерів у присутності різноманітних хімічних сполук. Загальна схема перероблення пластикових відходів шляхом сольволізу складається з наступних стадій [17]:

- 1) сортування та подрібнення полімерних матеріалів;
- 2) проведення процесу деполімеризації з використанням широкого діапазону розчинників, температур, тисків та каталізаторів;
- 3) очищення отриманих мономерів від можливих забруднювачів;
- 4) повернення мономерів до звичайних процесів виробництва пластмас як вторинної сировини.

Пластикові відходи деполімеризуються, взаємодіючи з різними сполуками: водою, кислотами, лугами, гліколем метанолом. Вибір відповідного реагенту залежить від якості матеріалу на вході. Встановлено, що процес сольволізу дозволяє розщепити на мономери до 90 % пластику, в результаті чого утворюється рідинна фракція, яка містить такі речовини, як бензойна кислота, бензальдегід, ізопропілфенілкетон, метілетіловий ефір, метілізобутіловий ефір, бензол і ацетальдегід [15,18].

Залежно від природи розчинника виділяють такі види сольволізу: гідроліз, гліколіз, метаноліз.

Гідроліз – це спосіб перероблення пластику, який передбачає реакцію полімерів з водою в лужному, кислому або нейтральному середовищі. Розрізняють [18]:

- лужний гідроліз відбувається у розчинах гідроксидів натрію або калію з концентрацією від 4 до 20 мас. %. Процес проводять в автоклаві при температурах 120–200 °С у водному розчині NaOH та при 110–120 °С у розчині KOH в метилцелозольві;

- кислотний гідроліз здійснюється з використанням концентрованих кислот (сульфатної, нітратної, фосфатної та оцтової) при температурі до

100 °С. Деякі розчини кислот можуть бути вкрай небезпечними для здоров'я людини і довкілля. Перевагою методу є висока контрольованість перебігу цільової реакції, що пояснюється низькими температурами ведення процесу;

- нейтральний гідроліз проводиться за допомогою гарячої води або пари в автоклаві високого тиску (1–4 МПа) при температурах 200–300 °С. Цей метод гідролізу є найбільш екологічно чистим. Головні недоліки полягають у низькій якості отриманого матеріалу, оскільки в ньому залишаються усі механічні домішки полімеру, що переробляється, а також висока вартість обладнання через проведення процесу при високих температурах і тиску у середовищі з високим рівнем корозії.

Гліколіз є різновидом методу гідролізу, головна особливість якого полягає у застосуванні гліколів (двоатомних спиртів, які містять дві гідроксильні групи, $C_nH_{2n}(OH)_2$), при температурах понад 210–250 °С. Для скорочення часу деполімеризації пластикових відходів процес проводять у присутності різних каталізаторів: гідроксилу, гідрокарбонату, хлориду, бромиду 1-бутил-3-метилімідазолію або ацетатів металів [19].

До переваг гліколізу відносять низькі вимоги до попереднього очищення і сортування пластикових відходів та практично повну безвідходність методу. Однак технологічні особливості ведення процесу не дозволяють використовувати деполімеризований матеріал для подальшого виробництва харчового пластику.

Метаноліз полягає у глибокій деполімеризації пластмас за допомогою метанолу. Процес протікає у спеціальних реакторах, де створюються температури понад 150 °С і забезпечується тиск від 2 до 4 МПа. Для прискорення протікання хімічних реакцій використовуються каталізатори, такі як магнію ацетат, кобальту ацетат та плюмбуму (IV) оксид. Продукт перероблення пластикових відходів дуже специфічний і може використовуватися тільки для подальшого отримання полієфірів. Крім того, він відноситься до небезпечних речовин: пило-повітряна суміш вибухонебезпечна, а частинки викликають подразнення слизових оболонок очей, дихальних шляхів і шкіри. Складність метанолізу викликана необхідністю ретельного попереднього очищення відходів, високою енергозатратністю процесу та вартістю метанолу [18].

Отже, методи сольволізу не завжди екологічно безпечні, енергоємні, вимагають використання високотехнологічного обладнання, певних хімічних реагентів, і тому досить дорогі. Однак порівняно з фізичними ці методи дозволяють переробляти пластикові відходи нижчої якості через додаткове очищення пластмас під час хімічних процесів.

Одним із перспективних шляхів вирішення проблеми утилізації відпрацьованих полімерних матеріалів є використання методу конверсії. Процес відбувається шляхом термохімічного розкладання

відходів на первинні мономери та інші корисні речовини за допомогою процесів піролізу або газифікації. Узагалі технологія конверсійного перетворення пластику здійснюється за такими стадіями [17]:

- 1) сортування відходів за типами полімерів;
- 2) миття та подрібнення матеріалу, що сприятиме стабільному протіканню процесів та утворенню більш якісних продуктів переробки;
- 3) безпосереднє проведення процесів піролізу або газифікації
- 4) розділення суміші продуктів переробки за різними фракціями (газ, рідина, твердий залишок);
- 5) виділення та видалення потенційних забруднень з отриманих вторинних матеріалів.

У основі піролізу пластикових відходів лежить ланцюг хімічних реакцій, що протікають у реакторі при температурах від 450 до 800 °С в інертному середовищі (без доступу кисню або повітря). За цих умов утворюються рідинні вуглеводні (синтетична нафта), суміш вуглеводневих газів і водню, а також твердий залишок у вигляді коксу і сполук металів. Вихід продуктів та їх співвідношення залежить від якісного складу переробляемого матеріалу, температури, тиску, часу перебування в реакторі, типу реактора та наявності каталізатору.

Під час використання температур вище 600 °С (термічний піроліз) у більшій кількості утворюються газоподібні продукти. Температура нижче 600 °С сприяє утворенню рідинної фракції. Проведення процесу за умов більш низьких температур можливе за рахунок використання каталізаторів (каталітичний піроліз).

Під час піролізу пластикових відходів використовують гомогенні (кислоти Льюїса: $TiCl_4$, $AlCl_3$, $FeCl_3$ и $TiCl_3$) і гетерогенні (цеоліти, кремнезем-глинозем, глинозем, глина/пісок, каолін, оксиди металів, молекулярні сита тощо) каталізатори. Каталізатори знижують енергію активації реакції, а, отже, збільшують швидкість розкладання полімеру, скорочують час проведення процесу, мають більш високу селективність до бажаних хімічних речовин. У цьому випадку одержувана рідинна фракція матиме поліпшену якість [20].

Таким чином, піроліз пластикових відходів – це добре контрольований процес, який дозволяє отримати різноманітні вторинні матеріали, що потім можуть використовуватися за призначенням. Під час піролізу полімерів утворюється синтетична нафта, яку за аналогією з природною сировиною можна переробляти на продукти нафтохімії, включаючи нові пластмаси, або застосовувати як дизельне паливо за рахунок наявності в її складі ароматичних вуглеводнів з високою теплотворною здатністю. Газоподібні продукти піролізу, що містять вуглеводні C_2 - C_4 , також володіють високою теплотворною здатністю, а, отже, можуть застосовуватися у газових двигунах. Така альтернатива допоможе зберегти викопне паливо, яке швидко виснажується.

Піролізний кокс можна залучити для будівельних цілей або як наповнювач у виробництві гуми, транспортерних стрічок тощо.

Однак, слід звернути увагу, що хлор, присутній у складі деяких типів пластмас, є одним з найбільш агресивних і небажаних компонентів при піролізі. Присутність сполук хлору викликає значну корозію обладнання під час зберігання, транспортування, спалювання продуктів піролізу, може призводити до отруєння каталізаторів, а також в подальшому викликати старіння піролізного масла. Крім того, хлор активно реагує з органічними продуктами піролізу з утворенням стійких отруйних сполук, зокрема діоксинів, які є отруйними для живих організмів. Сірка, яка присутня в деяких типах полімерів, в окисленій формі летка і також шкодить довкіллю. Уловлювання цих сполук з димових газів – процес дорогий і має свої складності. Це можна віднести до недоліків піролізу полімерних матеріалів [21].

До конверсійних методів перероблення пластику також належить процес газифікації, який є більш високотехнологічним видом утилізації твердих відходів порівняно з поширеним у світі їх спалюванням у сміттєспалювальних печах. Сутність процесу полягає у термічному розкладанні полімерів при температурах від 800 до 1500 °С за допомогою нестачі кисню і водяної пари. Газифікацію проводять у газогенераторних установках з використанням атмосферного повітря як джерела кисню. В результаті цього процесу утворюється генераторний газ або, так званий, синтез-газ, який складається з карбон (II) і (IV) оксидів, водню і метану. Ці гази можна використовувати у хімічній промисловості, а також для опалення та генерація електроенергії. Для підвищення ефективності газифікації та питомої теплоти згорання отриманої газової суміші процес ліпше проводити з використанням попередньо отриманих агломератів або гранул полімерних матеріалів [11].

Газифікація полімерних відходів – це достатньо простий з технологічної точки зору процес. Ведення процесу при високих температурах та при низькій концентрації кисню призводить до того, що токсини, такі як діоксини та фурани, практично не утворюються. До недоліків газифікації належить наявність азоту в повітрі, як баластової речовини. Це може знижувати теплотворну здатність генераторного газу через його розбавлення. За даних умов генераторні установки поки не конкурентоспроможні, оскільки отриманий газ виходить значно дорожчим ніж природна сировина.

Висновки

У сьогоднішній день проблема утилізації пластикових відходів надзвичайно актуальна і має глобальне значення, оскільки світове виробництво пластмас має стійку тенденцію до зростання. Це обумовлено високим попитом на полімерну

продукцію, незважаючи на зусилля світового суспільства протидіяти цьому. Частково вирішити проблему можливо за рахунок впровадження «циркулярної економіки» або «економіки замкненого циклу» (англ. Closed-loop economy, Circular economy). В цьому випадку модель економічного розвитку, заснована на відновленні та раціональному споживанні ресурсів, що є альтернативою традиційній, лінійній економіці, яка діє за принципами «take-make-dispose» – «беремо-виробляємо-викидаємо». Циркулярна ж економіка базується на принципі 3-R (Reduce, Reuse, Recycle):

- Reduce – скорочення використання ресурсів і віддання пріоритету відновлюваним матеріалам;

- Reuse – максимально ефективне використання продуктів, тобто використання речей як за їх первісним призначенням, так і для виконання нових, невластивих їм раніше функцій;

- Recycle – відновлення побічних матеріалів і відходів для подальшого використання в економіці.

Саме останній принцип, оснований на процесах фізичного чи хімічного перетворення будь-яких речей у нові матеріали або сировину, готові промислові вироби, в упаковку, конструкції або інші товари широкого вжитку дає можливість розробити ефективні шляхи поводження з пластиковими відходами. Таким чином, відпрацьовані пластмаси можуть стати економічно привабливими завдяки описаним вище методам перероблення, які дозволяють перетворити їх на цінну вторинну сировину. Це сприятиме створенню єдиного ринку вторинної сировини і зробить економіку менш залежною від первинних вуглеводневих ресурсів, які поступово виснажуються.

Дотепер в більшості випадків пластикові відходи переробляли за рахунок механічного рециклінгу, під час якого полімери подрібнюються, миються і переплавляються. Але цю процедуру можна повторювати всього кілька разів – і з кожним разом якість пластика погіршується, так що він все одно потрапляє на звалищі. Хімічне перероблення дозволяє утилізувати пластмаси багато разів без втрати якості. Але через більш високі витрати і низький попит фінансово ці методи були не вигідними.

Зараз в багатьох країнах світу вводяться обмеження на використання первинного пластику і розробляються законопроекти, які більш жорстко регулюють способи поводження з відходами. Це, в свою чергу, стимулює пришвидшення знаходження шляхів вирішення проблеми. Отже, технологія піролізу, будучи одним з найперспективніших методів поводження з пластиковими відходами, постійно вдосконалюється і знаходить ефективне впровадження у практиці. Причому, термічна деструкція полімерів при певних умовах може відповідати всім сучасним санітарно-гігієнічним нормам.

Список літератури

1. All in plastic. *Eastern European Association of the Green*. URL: <https://eea-greens.eu/2019/05/16/all-in-plastic/> (accessed 16.05.2019).
2. How Much Plastic Does the World Produce? *Our World in Data*. URL: <https://ourworldindata.org/plastic-pollution#how-much-plastic-does-the-world-produce> (accessed 23.11.2020).
3. Geyer R., Jambeck J. R., Law K. Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*. 2017. Vol. 3. no. 7. doi: 10.1126/sciadv.1700782.
4. Михайлова Є. О. Пластикове забруднення – одна з головних екологічних проблем людства. *Комунальне господарство міст*. 2020. Том 4, № 157. С. 109–121. doi: 10.33042/2522-1809-2020-4-157-109-121.
5. Plastic & Health: The Hidden Costs of a Plastic Planet. *Center for International Environmental Law (CIEL)*. 2019. URL: <https://www.ciel.org/plasticandhealth/>.
6. Baseline report on plastic waste. 2020. URL: https://gridarendal-website-live.s3.amazonaws.com/production/documents/:s_document/554/original/UNEP-CHW-PWPWG.1-INF-4.English.pdf?1594295332.
7. Brunner P. H., Rechberger H. Waste to energy – key element for sustainable waste management. *Waste Management*. 2015. Vol. 37. P. 3–12. doi: 10.1016/j.wasman.2014.02.003.
8. Михайлова Є. О., Ворожбян М. І., Мороз М. О., Панчева Г. М. Принципи впровадження екологічного маркування продукції. *Комунальне господарство міст*. 2018. Вип. 144. С. 43–50.
9. Михайлова Є. О., Панчева Г. М., Резніченко Г. М. Ефективні механізми поводження з твердими побутовими відходами в Україні. *Комунальне господарство міст*. 2019. Том 5, вип. 151. С. 37–44. doi: 10.33042/2522-1809-2019-5-151-37-44.
10. ASTM D7611 / D7611M-20, Standard Practice for Coding Plastic Manufactured Articles for Resin Identification. ASTM International, West Conshohocken, PA. 2020. URL: <https://www.astm.org/Standards/D7611.htm>.
11. Arun Kumar. Awasthi et al. Plastic solid waste utilization technologies: A Review. *IOP Conf. Series: Materials and Engineering*. 2017. 263. 022024. doi:10.1088/1757-899X/263/2/022024.
12. Ragaert K., Delva L., Van Geemb K. Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste. *Waste Management*. 2017. Vol. 69. P. 24–58. doi: 10.1016/j.wasman.2017.07.044.
13. ПЭТ-флекс: производство и применение хлопьев из пластика. *Recycle.net*. URL: <https://recycle.net/plastmassy/pet-fleks-hlopya-iz-plastika-proizvodstvo-i-primenenie>.
14. Технология производства вторичных гранул пластика: переработка полимеров и описание метода грануляции. *Recycle.net*. URL: <https://recycle.net/plastmassy/tehnologiya-proizvodstva-вторичных-гранул-пластика>.
15. Куликова Ю. В., Тукачева К. О. Анализ технологий утилизации полимерных композиционных материалов. *Транспорт. Транспортные сооружения. Экология*. 2017. Вып. 4. С. 103–120. doi: 10.15593/24111678/2017.04.08.
16. Directive 2008/98/EC of the European parliament and of the council of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives. URL: <http://data.europa.eu/eli/dir/2008/98/oj>.
17. Chemical Recycling: Making Plastics Circular. *Cefic*. Available at: <https://cefic.org/a-solution-provider-for-sustainability/chemical-recycling-making-plastics-circular/>.

18. Mădălina E. G. Methods of Recycling, Properties and Applications of Recycled Thermoplastic Polymers. *Recycling*, 2017, Vol. 2, 24. doi: 10.3390/recycling2040024.
19. Yue Q. F., Wang C. X., Zhang L. N., Ni Y., Jin Y. X. Glycolysis of poly(ethylene terephthalate) (PET) using basic ionic liquids as catalysts. *Polym. Degrad. Stab.* 2011, Vol. 96, P. 399–403. doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2010.12.020.
20. Adil Koç. Studying the Utilization of Plastic Waste by Chemical Recycling Method. *Open Journal of Applied Sciences*, 2013, Vol. 3, no. 7, P. 413–420. doi: 10.4236/ojapps.2013.37051.
21. Yuan G., Chen D., Yin L., Wang Z., Zhao L., & Wang J. Y. High efficiency chlorine removal from polyvinyl chloride (PVC) pyrolysis with a gaseliquid fluidized bed reactor. *Waste Management*, 2014, Vol. 34, P. 1045–1050. doi: 10.1016/j.wasman.2013.08.021.
10. ASTM D7611 / D7611M-20, Standard Practice for Coding Plastic Manufactured Articles for Resin Identification. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020. Available at: <https://www.astm.org/Standards/D7611.htm>.
11. Arun Kumar. Awasthi et al. Plastic solid waste utilization technologies: A Review. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2017, 263, 022024, doi:10.1088/1757-899X/263/2/022024.
12. Ragaert K., Delva L., Van Geemb K. Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste. *Waste Management*, 2017, Vol. 69, pp. 24–58, doi: 10.1016/j.wasman.2017.07.044.
13. PET-flex: proizvodstvo i primeneniye khlop'yev iz plastika [PET-flakes: production and use of plastic flakes]. *Recycle.net*. Available at: <https://rcycle.net/plastmassy/pet-fleks-hlop'ya-iz-plastika-proizvodstvo-i-primenenie>.
14. Tekhnologiya proizvodstva vtorichnykh granul plastika: pererabotka polimerov i opisaniye metoda granulyatsii [Technology for the production of secondary plastic granules: polymer processing and description of the granulation method]. *Recycle.net*. Available at: <https://rcycle.net/plastmassy/tehnologiya-proizvodstva-vtorichnykh-granul-plastika>.
15. Kulikova Yu. V., Tukacheva K. O. Analiz tekhnologiy utilizatsii polimernykh kompozitsionnykh materialov [Analysis of recycling technologies for polymer composite materials]. *Transport. Transport facilities. Ecology*, 2017, Vol. 4, pp. 103–120, doi: 10.15593/24111678/2017.04.08.
16. Directive 2008/98/EC of the European parliament and of the council of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives. Available at: <http://data.europa.eu/eli/dir/2008/98/oj>.
17. Chemical Recycling: Making Plastics Circular. *Cefic*. Available at: <https://cefic.org/a-solution-provider-for-sustainability/chemical-recycling-making-plastics-circular/>.
18. Mădălina Elena Grigore. Methods of Recycling, Properties and Applications of Recycled Thermoplastic Polymers. *Recycling*, 2017, Vol. 2, 24, doi: 10.3390/recycling2040024.
19. Yue Q. F., Wang C. X., Zhang L. N., Ni Y., Jin Y. X. Glycolysis of poly(ethylene terephthalate) (PET) using basic ionic liquids as catalysts. *Polym. Degrad. Stab.* 2011, Vol. 96, pp. 399–403, doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2010.12.020.
20. Adil Koç. Studying the Utilization of Plastic Waste by Chemical Recycling Method. *Open Journal of Applied Sciences*, 2013, Vol. 3, no. 7, pp. 413–420, doi: 10.4236/ojapps.2013.37051.
21. Yuan G., Chen D., Yin L., Wang Z., Zhao L., & Wang J. Y. High efficiency chlorine removal from polyvinyl chloride (PVC) pyrolysis with a gaseliquid fluidized bed reactor. *Waste Management*, 2014, Vol. 34, pp. 1045–1050, doi: 10.1016/j.wasman.2013.08.021.

References (transliterated)

1. All in plastic. *Eastern European Association of the Green*. Available at: <https://eea-greens.eu/2019/05/16/all-in-plastic/> (accessed 16.05.2019).
2. How Much Plastic Does the World Produce? *Our World in Data*. Available at: <https://ourworldindata.org/plastic-pollution#how-much-plastic-does-the-world-produce> (accessed 23.11.2020).
3. Geyer R., Jambeck J. R., & Law K. Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 2017, Vol. 3, no. 7, doi: 10.1126/sciadv.1700782.
4. Mykhailova E. O. Plastykove zabrudnennya – odna z holovnykh ekolohichnykh problem lyudstva. Komunal'ne hospodarstvo mist [Plastic pollution is one of the main environmental problem of humanity]. *Municipal Economy of the cities*, 2020, Vol. 4, no 157, pp. 109-121, doi: 10.33042/2522-1809-2020-4-157-109-121.
5. Plastic & Health: The Hidden Costs of a Plastic Planet. *Center for International Environmental Law (CIEL)*. 2019. Available at: <https://www.ciel.org/plasticandhealth/>.
6. Baseline report on plastic waste. 2020. Available at: https://gridarendal-website-live.s3.amazonaws.com/production/documents/s_document/554/original/UNEP-CHW-PWPWG.1-INF-4.English.pdf?1594295332.
7. Brunner P. H., Rechberger H. Waste to energy – key element for sustainable waste management. *Waste Management*, 2015, Vol. 37, pp. 3–12, doi: 10.1016/j.wasman.2014.02.003.
8. Mykhailova E. O., Vorozhbiiian M. I., Moroz M. O., Pancheva G. M. Prynyspy vprovadzhennya ekolohichnoho markuvannya produktsiyi [Principles of environmental labelling of production]. *Municipal Economy of the cities*, 2018, Vol. 144, pp. 43–50.
9. Mykhailova E. O., Pancheva G. M., Reznichenko G. M. Efektyvni mekhanizmy povodzhennya z tverdymy pobotovymy vidkhodamy v Ukraini [Effective mechanisms of municipal solid waste management in Ukraine]. *Municipal Economy of the cities*, 2019, Vol. 5, no 151, pp. 37–44, doi: 10.33042/2522-1809-2019-5-151-37-44.

Сведения об авторах (About authors)

Михайлова Євгенія Олександрівна – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця, доцент кафедри технологій і безпеки життєдіяльності; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0182-0823>; e-mail: mykhailova.e@ukr.net.

Evgeniia Mykhailova – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Associate Professor, Simon Kuznets Kharkov National University of Economics, Associate Professor of Department Technologies and Safety of Vital Activity; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0182-0823>; e-mail: mykhailova.e@ukr.net.

Дейнека Дмитро Миколайович – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри хімічної технології неорганічних речовин, каталізу та екології; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5233-6898>; e-mail: deynekadn@gmail.com.

Dmytro Deineka – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Associate Professor of Department of Chemical Technology of Inorganic Substances, Catalysis and Ecology; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5233-6898>; e-mail: deynekadn@gmail.com.

Панчева Ганна Михайлівна – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри охорони праці та навколишнього середовища; м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9397-3546>; e-mail: panchevaana84@ukr.net.

Hanna Pancheva – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Associate Professor of Department of Labour and Environment Protection; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9397-3546>; e-mail: panchevaana84@ukr.net.

Будь ласка, посилайтеся на цю статтю наступним чином:

Михайлова С. О., Дейнека Д. М., Панчева Г. М. Аналіз методів перероблення пластикових відходів. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: *Нові рішення в сучасних технологіях*. – Харків: НТУ «ХПІ». 2021. № 1 (7). С. 80–89. doi:10.20998/2413-4295.2021.01.12.

Please cite this article as:

Mykhailova E., Deineka D., Pancheva H. Analysis of plastic waste recycling methods. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2021, no. 1 (7), pp. 80–89, doi:10.20998/2413-4295.2021.01.12.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Михайлова Е. А., Дейнека Д. Н., Панчева А. М. Анализ методов переработки пластиковых отходов. *Вестник Национального технического университета «ХПИ»*. Серия: *Новые решения в современных технологиях*. – Харьков: НТУ «ХПИ». 2021. № 1 (7). С. 80–89. doi:10.20998/2413-4295.2021.01.12.

АННОТАЦІЯ *Рассмотрены способы обращения с пластиковыми отходами, количество которых постоянно растет из-за высокого спроса на полимерную продукцию, имеющую высокие эксплуатационные свойства. Актуальность проблемы обусловлена долговечностью пластика, который, попав в окружающую среду, постепенно деградирует с образованием веществ опасных для живых организмов. Наиболее распространенными способами обращения с пластиковыми отходами являются их складирование на специально отведенных земельных участках или сжигание с / без получения тепла. Каждый из этих способов имеет определенные недостатки, что вызывает необходимость внедрения других мероприятий. Перспективным с экологической и экономической точек зрения способом обращения с пластиковыми отходами может быть их переработка во вторичное сырье, энергию или продукцию с определенными потребительскими свойствами. Цель данной работы заключается в проведении анализа методов переработки пластиковых отходов, установления их преимуществ и недостатков, определение оптимальных подходов для утилизации полимерных материалов с различными свойствами. Рассмотрены две основные группы методов переработки полимеров: физические и химические. К физической переработке относят механический рециклинг, основанный на физическом измельчении пластиковых отходов с получением вторичного сырья без существенного изменения химической структуры материала. Этот процесс достаточно простой с точки зрения технического оформления, но требует тщательной сортировки и очистки отходов, а также имеет ограничения относительно повторного применения переработанного материала. Химическая переработка происходит путем проведения процессов сольволиза (гидролиза, гликолиза, метанолиза) и конверсии (пиролиза, газификации). В этом случае пластиковые отходы разлагаются на исходные молекулы – мономеры, из которых снова можно изготовить полимерный продукт с теми же свойствами. Химические методы позволяют утилизировать неотсортированные и загрязненные полимерные материалы много раз без потери их качества. Таким образом, внедрение описанных методов позволит уменьшить количество отходов, превратить их в ценное вторичное сырье и сократить использование природных ресурсов, используемых для получения первичных пластиковых материалов.*

Ключевые слова: *пластик; отходы; механический рециклинг; сольволиз; пиролиз; газификация.*

Надійшла (received) 27.02.2021

УДК 602

doi:10.20998/2413-4295.2021.01.13

ДОСЛІДЖЕННЯ ЩОДО ВДОСКОНАЛЕННЯ СПОСОБУ ПЕРІОДИЧНОЇ АЕРАЦІЇ СТІЧНИХ ВОД

М. Г. МІЦЬ, А. І. БОЖКОВ, К. С. БІЛОШЕНКО

кафедра молекулярної біології та біотехнології, Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, м. Харків, УКРАЇНА
e-mail: nmits@karazin.ua

АНОТАЦІЯ Процес аерації – це ключова ланка технології біологічної очистки стічних вод. Але, як це не парадоксально, за весь час існування цієї технології, вона істотно не змінилася. Процес аерації стічних вод залишається найбільшим споживачем електроенергії всього комплексу очисних споруд. Встановлено можливості регулювання тривалості циклу аерації в залежності від «вибухової» зміни кількості забруднень. В цьому випадку система повинна відреагувати на це «обурення» і скорегувати тривалість циклу аерації, щоб забезпечити необхідний кисневий режим біологічного окислення забруднень. Наведено дані досліджень способу періодичної аерації, заснованого на порівнянні концентрації кисню в рідині, яка очищується, та в газах, які відходять після аерації. Основний принцип полягає в тому, що система аерації продовжує подавати кисень, який вже не в змозі дифундувати в рідину, куди подається, і виходить на поверхню без участі в процесі масообміну. Експериментально встановлений спосіб регулювання тривалості періодів аерації для реалізації в одному аеротенку може бути застосований для цілої групи аеротенків. Використання способу в оптимальному режимі для кожного з визначеної кількості аеротенків неможливо без застосування мікропроцесора. Тому було розроблено спосіб контролю, який дозволяє застосувати принципово новий алгоритм періодичної аерації. Даний алгоритм дозволяє збільшити приріст активного мулу і домогтися підвищення ефективності очистки стічних вод. Для оцінки можливості стабілізації роботи певних аеротенків при реалізації періодичної аерації за концентрацією кисню в рідині був розглянутий модельний приклад, з якого випливає диференціальне рівняння балансу кисню в рідині. Вивчення цього рівняння на стабільність та поведінку у фазовій площині дає змогу вибрати умови, за яких алгоритм періодичної аерації буде найбільш ефективним з точки зору очищення та енергоспоживання. Теоретичний розрахунок дав математичне обґрунтування експериментальним даним. На основі чисельних розрахунків виведено умову оптимальної роботи аераційної системи для групи аеротенків. Таким чином було встановлено, що оптимальна концентрація кисню в рідині, при якій треба починати аерацію, це 0,06-0,12 мг/дм³. Періодична аерація з періодом приблизно у 30-40 хв. дає можливість підтримувати стабільний градієнт концентрації кисню в рідині. Робота очисних споруд за розробленим алгоритмом керованої аерації, відповідно до концентрації кисню в рідині, що очищується, підвищує продуктивність процесу та забезпечує раціональне використання електроенергії.

Ключові слова: періодична аерація; алгоритм подачі кисню при аерації; окислювальна здатність; коефіцієнт використання кисню (КВК); автоматичне регулювання; мікропроцесор; дрібнопухирцева аерація; кисень; повітря; стічні води; інтенсифікація

RESEARCH ON IMPROVEMENT OF THE METHOD OF PERIODIC AERATION OF WASTEWATER

N. MITS, K. BELOSHENKO, A. BOZHKO

Department of molecular biology and biotechnology V. N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine

ABSTRACT The aeration process is a key part of biological wastewater treatment technology. But, paradoxically, during the existence of this technology, it has not changed significantly. The process of aeration of wastewater remains the largest consumer of electricity in the entire complex of treatment facilities. The possibility of adjusting the duration of the aeration cycle depending on the "explosive" change in the amount of contaminants was stated. In this case, the system must respond to this "perturbation" and adjust the duration of the aeration cycle to provide the necessary oxygen regime of biological oxidation of contaminants. The research data on the method of periodic aeration based on a comparison of the concentration of oxygen in the liquid to be cleaned and in the gases leaving after aeration are presented. The basic principle is that the aeration system continues to supply oxygen, which is no longer able to diffuse into the aerated liquid, and comes to the surface, bypassing the process of mass transfer. The experimentally established method of adjusting the duration of aeration periods for implementation in one aeration tank can be applied to a whole group of aeration tanks. Using the method in the optimal mode for each of the specified number of aeration tanks is impossible without the use of a microprocessor. Therefore, a control method was developed that allows the application of a fundamentally new algorithm for periodic aeration. This algorithm allows to increase the growth of activated sludge and to increase the efficiency of wastewater treatment. To assess the possibility of stabilizing the operation of certain aeration tanks, in the implementation of intermittent aeration by the concentration of oxygen in the liquid, a model example was considered, from which follows the differential equation of oxygen balance in the liquid. The study of this system for stability and behavior in the phase plane makes it possible to choose the conditions under which the periodic aeration algorithm will be the most efficient in terms of purification and energy consumption. Theoretical calculation gave a mathematical justification for the experimental data. Based on numerical calculations, the condition of optimal operation of the aeration system for a group of aeration tanks is derived. Thus, it

was found that the optimal concentration of oxygen in the liquid at which to start aeration is 0.06-0.12 mg / dm³. Periodic aeration with a period of 30 minutes makes it possible to maintain a stable gradient of oxygen concentrations in the liquid. The productivity of treatment plants according to the developed algorithm of controlled aeration, in accordance with the concentration of oxygen in the liquid to be cleaned, ensures the rational use of electricity.

Keywords: *periodic aeration; algorithm for oxygen supply during aeration; oxidizable capacity; oxygen utilization factor (KVN); automatic adjustment; microprocessor; fine-bubble aeration; oxygen; air; sewage; intensification*

Вступ

В статті наведені дані досліджень способу періодичної аерації заснованого на порівнянні концентрації кисню в рідині, що аерується, і в газах, що виходять на поверхню після аерації. Показано, що такий спосіб контролю дозволяє застосувати принципово новий алгоритм періодичної аерації. Даний алгоритм дозволяє збільшити приріст активного мулу і домогтися підвищення ефективності очищення стічних вод. Теоретичний розрахунок дав математичне обґрунтування експериментальним даним. На основі чисельних розрахунків виведено умову оптимальної роботи аераційної системи для декількох аеротенків.

Спосіб періодичної аерації, який описаний в авторському свідоцтві [1] використовується для аерації міських комунальних стічних вод, які мають відносно стабільний хімічний склад на протязі всього періоду експлуатації. Відносно незмінний склад комунальних стічних вод [2-5] забезпечує стабільний склад, кількість та активність мікроорганізмів активного мулу, що дозволяє встановити тривалість аераційного циклу, яка найкраще відповідає очищенню конкретно цих стічних вод

Промислові стічні води, особливо фенольні води [6-8] коксохімічної промисловості, відрізняються нестабільним складом забруднень, який пов'язаний з технологічною циклічністю виробництва. Тому використання способу періодичної аерації з наперед заданою тривалістю циклів аерації неминуче приведе до розладу окислювальних процесів водомулової суміші та до непродуктивних витрат енергоресурсів.

Щоб усунути цей недолік, ми провели цикл досліджень та експериментів. Важливо було встановити можливість регулювання тривалості циклу аерації в залежності від зміни кисневого режиму біологічного окислення забруднень, які, в свою чергу, визначаються умовами життєдіяльності біоценозу активного мулу.

Мета роботи

Мета роботи – розробка методики вдосконалення способу періодичної аерації стічних вод із застосуванням керованого режиму подачі повітря до рідини, що очищається. На цей час абсолютна більшість очисних споруд використовує застарілу технологію аерації стічних вод, основний принцип якої – це безперервна подача повітря в рідину, що очищується. На нашу думку, сучасні вимірювальні прилади, розподільча арматура та

комп'ютерне забезпечення дають можливість організувати процес аерації на станціях очисних споруд стічних вод на технологічному рівні, який відповідає нинішньому розвитку науки та технології.

Виклад основного матеріалу

При проведенні досліджень було встановлено, що концентрація кисню, який розчинений у водномулової суміші, в процесі очистки стічних вод постійно змінюється. Тільки в тому випадку, коли надходження кисню до рідини, що очищується, значно перевищує її потребу [9], яка необхідна для окислювання забруднень, які надходять, тоді концентрація кисню стабілізується на рівні значення концентрації насичення, яка відповідає рівню забруднення суміші на цей час. Очевидно, що така ситуація неможлива при використанні періодичної аерації, що ми дійсно і спостерігали.

Також нами було встановлено, що концентрація кисню в повітрі, що вийшло на поверхню (тобто «відпрацьоване»), періодично змінювалася. В кінці періоду аерації вміст кисню в «відпрацьованому» повітрі був значно більше ніж величина, яка розрахована по коефіцієнту використання кисню (КВК) для цієї аераційної системи. Ці факти можна пояснити наступним: на початку кожного періоду аерації, коли в водномулової суміші вміст кисню мінімальний (оскільки в період відключення аерації розчинений в суміші кисень постійно споживається мікроорганізмами), насичення рідини киснем відбувається з максимальним КВК для даної аераційної системи. Тому і в «відпрацьованому» повітрі вміст кисню в цей період – мінімальний.

В процесі аерації концентрація його в рідині збільшується, ступінь використання кисню відповідно – знижується, а його вміст в «відпрацьованому» повітрі – збільшується.

Коли ми спостерігали на протязі багатьох випробувань таку закономірність, то прийшли до висновку, що можна керувати початком та кінцем періоду аерації в конкретному аеротенку, якщо безперервно контролювати зміни концентрації кисню в рідині та «відпрацьованому» повітрі. Зрозуміло, що практична реалізація такої можливості дозволила б стабілізувати не тільки процес біологічного окислення забруднень, під час періодичної аерації, а ще й оптимізувати його енергоспоживання. Важлива особливість цього способу регулювання тривалості періоду аерації – це використання принципу «зворотнього зв'язку» між процесами споживання кисню, при біологічному окисленні мікроорганізмами

та масообміну кисню з газоподібної фази в рідину. При цьому «зворотній зв'язок» дозволяє максимально використовувати можливості обох процесів.

Дослідження по визначенню можливості регулювання тривалості циклів при періодичній аерації стічних вод проводилися в лабораторному аеротенку ємністю 30 дм³ з пневматичною аерацією. Аеротенк заповнили рідиною яка містить в собі 250-650 мг/дм³ фенолів. Очистка фенольної рідини здійснювалася за допомогою активного мулу, який був адаптований до високої концентрації фенолів. Сигнали про початок та закінчення періоду аерації надходили від датчиків які вимірюють концентрацію кисню в рідині (прилад AR8010) та «відпрацьованому» повітрі (прилад AR8010). Виміри концентрації активного мулу пороводились за спектрометричною методикою [11] на спектрофотометрі UV-2600.

Результати експерименту

В табл. 1 внесені результати експериментів, які проводилися на протязі 10 діб кожний. Для порівняння ми проводили очистку фенольної води трьома способами:

- безперервним (класичним) способом [10];
- періодична аерація з регульованим циклом в залежності від показань датчиків;
- періодична аерація з задалегідь заданою тривалістю циклу (10 хвилин) [2].

Таблиця 1 – Порівняльні результати очистки стічних вод безперервною та періодичною аерацією

| N | Показники процесу очистки | Безперервна аерація | Періодична короткоциклова аерація | Регульований цикл |
|---|---|---------------------|-----------------------------------|-------------------|
| 1 | Час аерації віднесений до часу очистки % | 100 | 50 | 40 |
| 2 | Вміст активного мулу після 10 діб. Приріст об'єму % | 12 | 26 | 50 |

Данні з табл. 1 свідчать, що спосіб аерації, який пропонується (з регульованою тривалістю циклу), дозволяє досягти стабільного процесу очистки та більше, ніж в 2 рази скоротити витрати на аерацію (якщо рівняти з безперервною аерацією).

Для визначення кількісного значення вмісту кисню в рідині та «відпрацьованому» газі, при досягненні яких треба надавати сигнали про початок або кінець періоду аерації, були розроблені та проведені наступні дослідження. А саме, ми продовжили роботу з фенольною водою

(лабораторний аеротенк 30 дм³, вміст фенолу в рідині 250-650 мг/дм³) в режимі періодичної аерації. В цій серії експериментів закінчення періоду аерації було при значенні концентрації кисню в «відпрацьованому» газі 19% (КВК аераційної системи дорівнює 10%).

Аналіз даних, наведених в табл. 2, свідчить про наступне:

- в експериментах 1 і 2, було використано мінімальний час аерації, і ми одержали низький ступінь очистки рідини.

- в експериментах 8, 9, 10 ми досягли високого ступеня очистки, але при цьому було витрачено багато часу на аерацію,

- в експериментах 3, 4, 5, 6, та 7 був досягнутий необхідний рівень очищення рідини, і при цьому час, витрачений на аерацію, був найменший.

Таблиця 2 – Результати досліджень по визначенню оптимального значення концентрації кисню в рідині, що обробляється, яке відповідає початку періоду аерації

| N | Вміст кисню в рідині, при якому починали аерацію (мг/дм ³) | Загальний час аерації (години) | Залишкова концентрація фенолів в рідині яку очистили (мг/дм ³) |
|----|--|--------------------------------|--|
| 1 | 0 | 2,0 | 60 |
| 2 | 0,02 | 2,0 | 38 |
| 3 | 0,04 | 2,2 | 1,0 |
| 4 | 0,06 | 2,2 | 0,5 |
| 5 | 0,08 | 2,2 | 0,6 |
| 6 | 0,10 | 2,2 | 0,4 |
| 7 | 0,12 | 2,5 | 0,3 |
| 8 | 0,14 | 2,7 | 0,5 |
| 9 | 0,20 | 3,0 | 0,2 |
| 10 | 1,00 | 4,0 | 0,6 |

Обговорення результатів

Експериментально встановлений спосіб регулювання тривалості періодів аерації для реалізації в одиничному аеротенку може бути застосований для цілої групи аеротенків. Використання способу в оптимальному режимі для кожного з визначеної кількості аеротенків (за наявності спільного колектора або повітряної магістралі від компресорів) практично неможливо без застосування мікропроцесора. Крім того, флуктуації метаболічної активності мікроорганізмів, коли на них впливають об'єктивні та суб'єктивні фактори (вік, агрегатне становище активного мулу, коливання температури і рН, «вибухові» навантаження забрудненнями та інше), неминуче будуть приводити до невідповідності окислювальних процесів в одиничних аеротенках з періодами включення-виключення аераційних систем в групі аеротенків.

Тому для оцінки можливості стабілізації роботи одиничних аеротенків при реалізації

переривчастої аерації відповідно до концентрації кисню в рідині був розглянутий наступний модельний приклад.

Концентрація кисню в будь-якому аеротенку змінюється відповідно до рівняння:

$$\frac{dC_i}{dt} = D_i(C_{ip} - C_i) - v_m \frac{C_i}{C_i + K_m}, \quad (1)$$

де D_i – коефіцієнт, що характеризує час масопередачі кисню; v_m – швидкість, з якою мікроорганізми вживають кисень; i – номер аеротенка.

Величина D_i дорівнює 0 в момент вимикання аераційної системи, а в момент включення аерації залежить від загальної кількості аеротенків, що аеруються

$$D_i = \begin{cases} 0 & \text{система вимкнена} \\ \frac{D_0}{n} & \text{система включена} \end{cases} \quad (2)$$

де n – кількість включених на цей час аеротенків.

Спосіб керування періодичною аерацією визначається таким алгоритмом, яким задається момент включення або виключення аераційної системи в випадково визначеному аеротенку.

Розрахунки, які були виконані в середовищі Matlab по кількісному рішенню [12] рівняння (1) для $I=6$ виявили, що надзвичайно висока ступінь стабілізації процесу повинна бути досягнута, якщо в якості критерію включення-виключення використовувати наступну вимогу:

$$C_i > \bar{C} = \bar{C} + K\sqrt{\partial^2 C}, \quad (3)$$

де \bar{C} – середня по аеротенках концентрація кисню

$$\bar{C} = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I C_i \quad (4)$$

$\partial^2 C$ – дисперсія відхилення концентрації від середньої

$$\partial^2 C = \frac{1}{I-1} \sum_{i=1}^I (C_i - \bar{C})^2 \quad (5)$$

Величина K може мати любий знак або бути рівною нулю і визначає середню долю часу, в який аераційна система включена (по відношенню до певної заданої тривалості часу експлуатації). Можна також говорити і про середню кількість аеротенків, що працюють в даний момент часу. В цьому випадку величина K визначається в залежності від особливостей рідини, що очищається, видів мікроорганізмів і зовнішніх умов.

Нульове значення K практично приводить до того, що в кожний момент часу включена рівно половина аераційних систем, позитивне значення K означає, що включені менше половини систем, а негативне значення K – що більше половини. Чим більше абсолютне значення K , тим більша частка включених систем відрізняється від 0.5.

На практиці, крім того, величина K може задаватися в залежності від необхідної при цьому якості очищення або ж від сумарної кількості забруднень, що надходять в аеротенк.

Поєднання описаного способу стабілізації роботи одиничних аеротенків з розробленим способом управління періодами аерації у відповідності з концентрацією кисню в рідині, що очищується, є теоретичним результатом, який підтверджено в експериментальному розділі статті.

Висновки

Оптимальна концентрація кисню в рідині при якій треба починати аерацію, це 0,06-0,12 мг/дм³.

Періодична аерація з періодом у 30-40 хв. дає можливість підтримувати стабільний градієнт концентрацій кисню в рідині

Продуктивність роботи очисних споруд за розробленим алгоритмом керованої аерації, відповідно з концентрацією кисню в рідині, що очищується, забезпечує раціональне використання електроенергії та підвищує продуктивність очисних споруд.

Список літератури

1. Патент України на корисну модель №143323, публ. від 27.07.2020, бюл. № 14.
2. Sophonsiri C., Morgenroth E. Chemical composition associated with different particle size fractions in municipal, industrial, and agricultural wastewaters. *Chemosphere*. 2004. 55. 5. P. 691-703. doi: 10.1016/j.chemosphere.2003.11.032.
3. Huang Man-hong, Li Yong-mei, Gu Guo-wei. Chemical composition of organic matters in domestic wastewater. *Desalination*. 2010. 262. 1-3. P. 36-42. doi: 10.1016/j.desal.2010.05.037.
4. Clevenger T. E., et al. Chemical composition and possible mutagenicity of municipal sludges. *Journal (Water Pollution Control Federation)*. 1983. 55. 12. P. 1470-1475.
5. Barber L. B., Brown G. K., Zaugg S. D. Potential endocrine disrupting organic chemicals in treated municipal wastewater and river water. *ACS Symposium Series*. 2000. 747. P. 97-123. doi: 10.1021/bk-2000-0747.ch007.

6. Alshabib M., Onaizi S. A. A review on phenolic wastewater remediation using homogeneous and heterogeneous enzymatic processes: Current status and potential challenges. *Separation and Purification Technology*. 2019. 219. P. 186-207. doi: 10.1016/j.seppur.2019.03.028.
7. Dec J., Bollag J.-M. Use of plant material for the decontamination of water polluted with phenols. *Biotechnology and Bioengineering*. 1994. 44. 9. P. 1132-1139. doi: 10.1002/bit.260440915.
8. Annachhatre A. P., Gheewala S. H. Biodegradation of chlorinated phenolic compounds. *Biotechnology Advances*. 1996. 14. 1. P. 35-56. doi: 10.1016/0734-9750(96)00002-X.
9. Sander R. Compilation of Henry's law constants (version 4.0) for water as solvent. *Atmos. Chem. Phys.* 2015. Vol. 15. № 8. P. 4399-4981. doi: 10.5194/acp-15-4399-2015.
10. Rosso D., Larson L. E., Stenstrom M. K. Aeration of large-scale municipal wastewater treatment plants: state of the art. *Water Science and Technology*. 2008. 57. 7. P. 973-8. doi: 10.2166/wst.2008.218.
11. Рошаль А. Д. *Фотоника. Электронная абсорбционная спектроскопия*. Х: ХНУ им. В. Н. Каразина, 2019. 240 с.
12. Gilsing H., Shardlow T. SDELab: A package for solving stochastic differential equations in MATLAB. *Journal of Computational and Applied Mathematics*. 2007. 205. 2. P. 1002-1018. doi: 10.1016/j.cam.2006.05.037.
3. Huang Man-hong, Li Yong-mei, Gu Guo-wei. Chemical composition of organic matters in domestic wastewater. *Desalination*, 2010, 262, 1-3, pp. 36-42, doi: 10.1016/j.desal.2010.05.037.
4. Clevenger T. E., et al. Chemical composition and possible mutagenicity of municipal sludges. *Journal (Water Pollution Control Federation)*, 1983, 55, 12, pp. 1470-1475.
5. Barber L. B., Brown G. K., Zaugg S. D. Potential endocrine disrupting organic chemicals in treated municipal wastewater and river water. *ACS Symposium Series*, 2000, 747, pp. 97-123, doi: 10.1021/bk-2000-0747.ch007.
6. Alshabib M., Onaizi S. A. A review on phenolic wastewater remediation using homogeneous and heterogeneous enzymatic processes: Current status and potential challenges. *Separation and Purification Technology*, 2019, 219, pp. 186-207, doi: 10.1016/j.seppur.2019.03.028.
7. Dec J., Bollag J.-M. Use of plant material for the decontamination of water polluted with phenols. *Biotechnology and Bioengineering*, 1994, 44, 9, pp. 1132-1139, doi: 10.1002/bit.260440915.
8. Annachhatre A. P., Gheewala S. H. Biodegradation of chlorinated phenolic compounds. *Biotechnology Advances*, 1996, 14, 1, pp. 35-56, doi: 10.1016/0734-9750(96)00002-X.
9. Sander R. Compilation of Henry's law constants (version 4.0) for water as solvent. *Atmos. Chem. Phys.*, 2015, 15, 8, pp. 4399-4981, doi: 10.5194/acp-15-4399-2015.
10. Rosso D., Larson L. E., Stenstrom M. K. Aeration of large-scale municipal wastewater treatment plants: state of the art. *Water Science and Technology*, 2008, 57, 7, pp. 973-8, doi: 10.2166/wst.2008.218.
11. Roshal' A. D. *Фотоника. Электронная абсорбционная спектроскопия*. Kh. KhNU im. V. N. Karazina, 2019. 240 p.
12. Gilsing H., Shardlow T. SDELab: A package for solving stochastic differential equations in MATLAB. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 2007, 205, 2, pp. 1002-1018. doi: 10.1016/j.cam.2006.05.037.

References (transliterated)

1. Patent Ukraini na korisnu model' #143323, publ. vi'd 27.07.2020, byul. #14.
2. Sophonsiri C., Morgenroth E. Chemical composition associated with different particle size fractions in municipal, industrial, and agricultural wastewaters. *Chemosphere*, 2004, 55, 5, pp. 691-703, doi: 10.1016/j.chemosphere.2003.11.032.
3. Roshal' A. D. *Фотоника. Электронная абсорбционная спектроскопия*. Kh. KhNU im. V. N. Karazina, 2019. 240 p.
4. Gilsing H., Shardlow T. SDELab: A package for solving stochastic differential equations in MATLAB. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 2007, 205, 2, pp. 1002-1018. doi: 10.1016/j.cam.2006.05.037.

Відомості про авторів

Миць Микола Георгійович – науковий співробітник, Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, м. Харків, Україна, e-mail: nmits@karazin.ua.

Mykola Mits - Scientist, Kharkiv National University of V.N. Karazina, Kharkiv, Ukraine; e-mail: nmits@karazin.ua.

Білошенко Костянтин Сергійович – кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри молекулярної біології та біотехнології, Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-9387-3147; e-mail: kbeloshenko@karazin.ua.

Kostyantyn Beloshenko - Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor of the Department of Molecular Biology and Biotechnology, Kharkiv National University of Name V.N. Karazina, M. Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-9387-3147; e-mail: kbeloshenko@karazin.ua.

Божков Анатолій Іванович – доктор біологічних наук, професор, Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0001-8418-5716; e-mail: bozhkov@univer.kharkov.ua.

Anatoly Bozhkov - Doctor of Biological Sciences, Professor, Kharkiv National University of V.N. Karazina, Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0001-8418-5716; e-mail: bozhkov@univer.kharkov.ua.

Будь ласка, посилайтеся на цю статтю наступним чином:

Миць М. Г., Білошенко К. С., Божков А. І. Дослідження щодо вдосконалення способу періодичної аерації стічних вод. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2021. № 1 (7). С. 90-95. doi:10.20998/2413-4295.2021.01.13.

Please cite this article as:

Mits N., Beloshenko K., Bozhkov A. Research on improvement of the method of periodic aeration of wastewater. *Bulletin of the National Technical University "KhPI"*. Series: New solutions in modern technology. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2021, no. 1 (7), pp. 90-95, doi:10.20998/2413-4295.2021.01.13.

Пожалуйста, ссылаетесь на эту статью следующим образом:

Миц Н. Г., Билошенко К. С., Божков А. И. Исследования по совершенствованию способа периодической аэрации сточных вод. *Вестник Национального технического университета «ХПИ»*. Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». 2021. № 1 (7). С. 90-95. doi:10.20998/2413-4295.2021.01.13.

АННОТАЦИЯ Процесс аэрации – это ключевое звено технологии биологической очистки сточных вод. Но, как это ни парадоксально, за все время существования этой технологии, она существенно не изменилась. Процесс аэрации сточных вод остается крупнейшим потребителем электроэнергии всего комплекса очистных сооружений. Установлена возможность регулирования продолжительности цикла аэрации в зависимости от «взрывного» изменения количества загрязнений. В этом случае система должна отреагировать на это «возмущение» и скорректировать продолжительность цикла аэрации, чтобы обеспечить необходимый кислородный режим биологического окисления загрязнений. Приведены данные исследований способа периодической аэрации основанного на сравнении концентрации кислорода в жидкости, которая очищается, и в отходящих газах после аэрации. Основной принцип заключается в том, что система аэрации продолжает подавать кислород, который уже не в состоянии диффундировать в жидкость, которая аэрируется, и выходит на поверхность, минуя процесс массообмена. Экспериментально установленный способ регулирования продолжительности периодов аэрации для реализации в одной аэротенке может быть применен для целой группы аэротенков. Использование способа в оптимальном режиме для каждого из группы аэротенков невозможно без применения микропроцессора. Поэтому был разработан способ контроля, который позволяет применить принципиально новый алгоритм периодической аэрации. Данный алгоритм позволяет увеличить прирост активного ила и добиться повышения эффективности очистки сточных вод. Для оценки возможности стабилизации работы единичных аэротенков при реализации прерывистой аэрации по концентрации кислорода в жидкости был рассмотрен модельный пример, из которого следует дифференциальное уравнение баланса кислорода в жидкости. Изучение этого уравнения на стабильность и поведение в фазовой плоскости позволяет выбрать условия, при которых алгоритм периодической аэрации будет наиболее эффективным с точки зрения очистки и энергопотребления. Теоретический расчет дал математическое обоснование экспериментальным данным. На основе численных расчетов выведено условие оптимальной работы аэрационной системы для группы аэротенков. Таким образом было установлено, что оптимальная концентрация кислорода в жидкости, при которой надо начинать аэрацию, это 0,06–0,12 мг/дм³. Периодическая аэрация с периодом в 30 мин. дает возможность поддерживать стабильный градиент концентраций кислорода в жидкости. Производительность работы очистных сооружений по разработанному алгоритму управляемой аэрации в соответствии с концентрацией кислорода в жидкости, которая очищается, обеспечивает рациональное использование электроэнергии и повышает производительность процесса.

Ключевые слова: периодическая аэрация; алгоритм подачи кислорода при аэрации; окислительная способность; коэффициент использования кислорода (КИК), автоматическое регулирование; микропроцессор; мелкопузырчатая аэрация; кислород воздуха; сточные воды; интенсификация

Надійшла (received) 10.11.2020

УДК 621.35

doi:10.20998/2413-4295.2021.01.14

ЗАСТОСУВАННЯ ПЛАЗМО-ЕЛЕКТРОЛІТНИХ ПОКРИТТІВ НА ТИТАНІ З ТУГОПЛАВКИМИ МЕТАЛАМИ ДЛЯ ДЕТОКСИКАЦІЇ СЕРЕДОВИЩ ВІД ЗАБРУДНЮВАЛЬНИХ РЕЧОВИН ТЕХНОГЕННОГО ПОХОДЖЕННЯ

М. Д. САХНЕНКО¹, І. М. ІНДИКОВ¹, Г. В. КАРАКУРКЧИ^{2*}

¹кафедра фізичної хімії, Національний технічний університет «ХПІ», Харків, УКРАЇНА

²Військовий інститут танкових військ Національного технічного університету «ХПІ», Харків, УКРАЇНА

*e-mail: anyutikukr@gmail.com

АНОТАЦІЯ На основі проведеного огляду особливостей перебігу фотокаталітичних процесів визначено особливості каталітичної дії оксидних систем на основі діоксиду титану. Показано, що TiO_2 є одним із найбільш хімічно і термічно стабільних і нетоксичних неорганічних оксидів напівпровідників, фотокаталітична активність якого проявляється при опроміненні ультрафіолетовою частиною спектру (λ 320–400 нм) та дозволяє окиснювати значну кількість токсичних агентів до води та вуглекислого газу. Розглянуто сутність фотокаталітичного процесу окиснення токсикантів під дією УФ-випромінювання на поверхні TiO_2 . Запропонована технологія фотокаталітичної детоксикації забруднювальних агентів є економічно доступною, екологічно чистою і дає можливість її широкого розповсюдження, зокрема для автономних систем, у т.ч. подвійного призначення. Встановлено, що основними вимогами до матеріалів для фотокаталізу є їхня хімічна та біологічна інертність, фотокаталітична стабільність та активність, невисока собівартість. Показано, що найбільш раціональною технологічною формою фотокаталізатора є нанесення (синтез) каталітичного шару на структурованих металевих підкладах, зокрема сплавах титану. Доведено, що ефективно формувати означені каталітичні оксидні системи можна методом плазмо-електролітного оксидування у водних електролітах з додаванням сполук металів-допантів, що підвищують фотокаталітичну активність одержаних гетерооксидних систем. Як цільовий допант запропоновано використовувати оксиди вольфраму змінної валентності. Досліджено кінетичні закономірності процесу плазмоелектролітного оксидування титану VT1-0 у дифосфатно-боратному електроліті із додаванням вольфраматів. Показано, що в електроліті цього типу за густини струму $1,0 \text{ A/dm}^2$ в гальваностатичному режимі протягом 30 хв формується рівномірне покриття $TiO_2-W_xO_y$ із трубчастого тороподібного структурою та вмістом вольфраму 2,5–7,5 мас. %. Прогнозований кількісний склад гетерооксидного шару у сукупності із морфологією поверхні створюють передумови високої каталітичної активності синтезованого покриття для детоксикації середовищ від забруднювальних речовин техногенного походження.

Ключові слова: плазмо-електролітне оксидування; сплав титану; фотокаталітичне покриття; вольфрамвмісне оксидне покриття

APPLICATION OF PLASMA-ELECTROLYTE COATINGS ON TITANIUM WITH REFRACTORY METALS FOR DETOXIFICATION OF ENVIRONMENTS FROM POLLUTING SUBSTANCES

М. САХНЕНКО¹, І. ІНДИКОВ¹, Г. КАРАКУРКЧИ²

¹Department of Physical Chemistry of National Technical University "KhPI", Kharkiv, UKRAINE

²Military Institute of Armored Forces of National Technical University "KhPI", Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT Based on the review of the peculiarities of the photocatalytic processes, the peculiarities of the catalytic action of oxide systems based on titanium dioxide are determined. It is shown that TiO_2 is one of the most chemically and thermally stable and non-toxic inorganic oxides of semiconductors, whose photocatalytic activity is manifested by irradiation with ultraviolet part of the spectrum (λ 320–400 nm) and allows the oxidation of a significant amount of toxic agents to water and carbon dioxide. The essence of the photocatalytic process of oxidation of toxicants under the action of UV radiation on the TiO_2 surface is considered. The proposed technology of photocatalytic detoxification of contaminants is economically available, environmentally friendly and allows its widespread use, in particular for autonomous systems, including dual purpose. It is established that the main requirements for materials for photocatalysis are their chemical and biological inertness, photocatalytic stability and activity, low cost. It is shown that the most rational technological form of the photocatalyst is the application (synthesis) of the catalytic layer on structured metal substrates, in particular titanium alloys. It is proved that these catalytic oxide systems can be effectively formed by the method of plasma-electrolyte oxidation in aqueous electrolytes with the addition of dopant metal compounds that increase the photocatalytic activity of the obtained heterooxide systems. It is proposed to use tungsten oxides of variable valence as the target additive. The kinetic regularities of the process of plasma-electrolytic oxidation of titanium VT1-0 in a diphosphate-borate electrolyte with the addition of tungstates have been studied. It is shown that in an electrolyte of this type at a current density of 1.0 A/dm^2 in the galvanostatic mode for 30 min a uniform coating of $TiO_2-W_xO_y$ with a tubular torus-like structure and tungsten content of 2.5–7.5 wt.% is formed. The predicted quantitative composition of the heteroxide layer in combination with the surface morphology creates the preconditions for high catalytic activity of the synthesized coating for detoxification of media from anthropogenic pollutants.

Keywords: plasma electrolyte oxidation; titanium alloy; photocatalytic coating; tungsten-containing oxide coating

Вступ

Сучасні тенденції розвитку науки і техніки обумовлюють потребу в розробці нових

композиційних матеріалів на основі компонентів нанорозмірної дисперсності, оскільки властивості матеріалів визначаються сукупністю таких параметрів, як хімічний склад, особливості будови

компонентів та їх розмірність. Виробництво композиційних матеріалів із комплексом функціональних властивостей (висока поглинальна здатність, хімічна стійкість, каталітичні та магнітні характеристики, висока міцність і стійкість до теплового й світлового випромінювання) є одним з найбільш перспективних напрямів впровадження та застосування нанотехнологій у хімічному матеріалознавстві [1].

Значні успіхи в цій галузі забезпечує, зокрема, застосування нанорозмірних оксидів металів, що володіють фотокаталітичною активністю [2]. Такі технології вже використовуються для очищення повітря від домішок парів і газів токсичних хімічних речовин, вірусів, хвороботворних бактерій шляхом глибокого окиснення під дією ультрафіолетового (УФ) випромінювання. Деякі нанорозмірні неорганічні оксиди, такі як оксиди титану, цинку, цирконію, вольфраму, заліза і деяких інших, використовуються для знезараження середовищ, забруднених небезпечними високотоксичними агентами [1,3]. Ефект фотокаталітичного окиснення заснований на високій реакційній здатності нанокристалічної структури оксидів означених металів. Також ці системи володіють підвищеною механічною стійкістю, високою електро- і теплопровідністю та відносно низькою вартістю.

Провідне місце серед найбільш досліджуваних матеріалів у прикладному фотокаталізі займає діоксид титану (TiO_2). Він володіє високою фотоактивністю і рухливістю нерівноважних носіїв заряду, фотокорозійною стабільністю, біологічною інертністю і високою гідрофільністю, які різко зростають в умовах УФ-опромінювання [2,4]. У науковій спільноті активно досліджуються фотокаталітичні системи на основі TiO_2 , які додатково доповані, зокрема, оксидами перехідних, рідкоземельних та тугоплавких металів [2,5-7].

Тому науковий та практичний інтерес до розробки фотокаталітичних систем на основі діоксиду титану є вельми актуальним та обумовлений перспективами створення на цій основі високоєфективних технологій безреагентного очищення газових та водних середовищ, в тому числі подвійного призначення.

Мета та задачі роботи

Метою роботи є дослідження застосування плазмо-електролітичних покриттів на титані з тугоплавкими металами для детоксикації середовищ від забруднювальних агентів.

Для досягнення визначеної мети необхідно вирішити наступні задачі:

- визначити особливості фотокаталітичної дії оксидних систем на основі TiO_2 ;
- провести аналіз існуючих вимог до каталітичних матеріалів для фотокаталізу та

обґрунтувати вибір технологічної форми каталітичної композиції та спосіб її одержання;

- дослідити можливість синтезу плазмо-електролітичних покриттів $\text{TiO}_2 \cdot \text{W}_x\text{O}_y$ на титані та визначити їх основні характеристики.

Матеріали і методи

Формування змішаних вольфраміваних оксидних систем $\text{TiO}_2 \cdot \text{W}_x\text{O}_y$ здійснювали на сплаві титану ВТ1-0 методом ПЕО у гальваностатичному режимі. Електрохімічну обробку проводили в термостатованій електролітичній комірці в дифосфатно-боратному електроліті на основі $\text{K}_4\text{P}_2\text{O}_7$ та $\text{Na}_4\text{B}_4\text{O}_7$ із додаванням Na_2WO_4 . Густина струму оксидування складала $1,0 \text{ А/дм}^2$. Напруга процесу ПЕО змінювалась у межах $140\text{--}220 \text{ В}$. Процес супроводжувався інтенсивним перемішуванням електроліту за допомогою магнітної мішалки та проточним циркуляційним охолодженням. Тривалість обробки становила 30 хв.

Морфологію поверхні сформованих покриттів вивчали методом сканівної мікроскопії на мікроскопі ZEISS EVO 40XVP. Хімічний склад покриттів визначали на енерго-дисперсійному спектрометрі Oxford INCA Energy 350 з програмним забезпеченням SmartSEM.

Виклад основного матеріалу

Діоксид титану (TiO_2) є одним із найбільш хімічно і термічно стабільних і нетоксичних неорганічних оксидів напівпровідників, фотокаталітична активність якого проявляється при опроміненні ультрафіолетовою частиною спектру ($\lambda - 320\text{--}400 \text{ нм}$). На поверхні TiO_2 під впливом УФ випромінювання багато органічних сполук можуть бути окиснені до вуглекислого газу і води. Ефект фотокаталітичного окиснення заснований на переході нанокристалічної структури діоксиду титану в електронно-збуджений стан й утворенні активних кисневмісних радикалів, які окиснюють хімічні сполуки та ініціюють їх подальше перетворення аж до повної мінералізації [8].

Необхідними умовами фотокаталітичного розкладання органічних сполук є певна кристалічна модифікація діоксиду титану (анатаз, рутил або Брук) та значна питома поверхня каталізатора, що забезпечує адсорбцію парів органічних речовин і подальше їхнє окиснення на поверхні фотокаталізатора при УФ-опроміненні. При цьому процес окиснення хімічних речовин відбувається при кімнатній температурі й атмосферному тиску з використанням безпечних джерел УФ випромінювання.

Останнім часом фотокаталітичні процеси все частіше застосовуються у різних галузях. Зокрема гетерогенний фотокаталіз позитивно зарекомендував себе як недорога та ефективна технологія для очищення газових та водних середовищ від ряду

небезпечних забруднювальних сполук, включаючи органічні речовини та важкі метали [1,9].

Використання сонячного світла або ультрафіолетового випромінювання, робить технологію фотокаталітичного очищення економічно доступною, екологічно чистою і дає можливість її широкого розповсюдження. Використання фотокаталітичних процесів вимагає мінімального обладнання, що дозволяє її автономне застосування на об'єктах без доступу до електрики. Саме цей фактор є визначальним для впровадження означеного підходу у технології подвійного призначення.

Сутність фотокаталітичного процесу окиснення токсикантів полягає в наступному: під дією світлової енергії в частинках TiO_2 утворюються електронно-діркові пари. Дірки, при виході на поверхню частинки, вступають у взаємодію з донором електронів в розчині або з гідроксил іонами з утворенням сильних окиснювачів таких, як гідроксильні або супероксидні радикали. У свою чергу, електрони провідності, виходячи на поверхню TiO_2 , взаємодіють з киснем, що призводить до утворення супероксид-аніон-радикала $O_2^{\cdot-}$, електрон може взаємодіяти з органічними речовинами, які можуть виступати як акцептори електронів. Утворення такого роду частинок робить поверхню TiO_2 достатньо сильним окиснювачем, що дозволяє проводити мінералізацію шкідливих речовин шляхом їх фотокаталітичного окиснення до H_2O і CO_2 . Слід зауважити, що частинка OH^{\cdot} , є дуже сильним окислювачем (стандартний окисно-відновний потенціал 2,8 В), здатним знешкодити більшість органічних речовин до CO_2 і H_2O [4].

На рис. 1 зображена схема утворення таких окиснювачів на поверхні TiO_2 під дією світлової енергії.

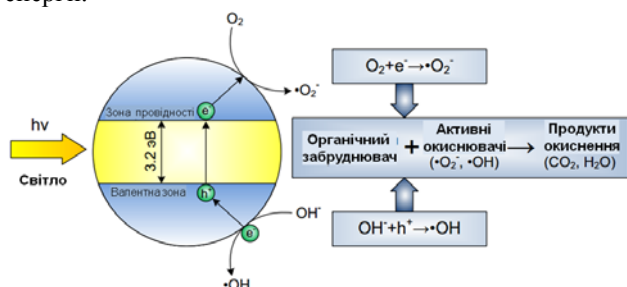


Рис. 1 – Схема утворення частинок OH^{\cdot} , $O_2^{\cdot-}$ на поверхні TiO_2 під дією світла.

Прикладом практичного застосування означеної технології є розробка композитного фотокаталізатора, що має селективну дію по відношенню до процесу відновлення CO_2 в CO під дією видимого світла. Основними компонентами, що входять до складу даного фотокаталізатора, є фермент (каталізатор), барвник, а також наночастинки діоксиду титану [10]. Наведена система характеризується високою селективністю та дозволяє отримати цільовий продукт без небажаних домішок.

На підставі аналізу масиву наявної науково-технічної інформації з досліджуваного питання зроблено висновок, що у загальному вигляді каталізатор складається з матриці (матеріалу-носія) і каталітично активної шару. В цілому, активність такої системи визначається фазовим складом, наявністю домішок на поверхні та в його об'ємі, а також розміром частинок [4,11]. У той же час основними вимогами, що висуваються до фотокаталізатора, є хімічна та біологічна інертність, фотокаталітична стабільність, невисока виробнича вартість та активність під дією сонячних променів [1,4].

Незважаючи на значну кількість наукових робіт з фотокаталізу за участю TiO_2 , на сьогодні дискусійним питанням все ще залишаються оптимальні характеристики фотокаталітичного матеріалу, зокрема, розмір, морфологія, структура, при яких спостерігається найбільша активність, а також раціональна технологічна форма каталізатора.

Більш зручним та практичним, із урахуванням перспективних галузей застосування, є нанесення каталітичного шару на структуровані підкладки [12].

Серед способів отримання таких каталітичних систем на високорозвинених структурованих носіях, що дозволяє технологічно формувати багатокомпонентні оксидні покриття на металах і сплавах, є плазмо-електролітне окиснення (ПЕО) – електрохімічне окиснення поверхні металу або сплаву в умовах дії електричних, мікродугових і дугових розрядів [13].

З технологічної точки зору, для отримання каталітичних систем представляють інтерес наступні особливості методу ПЕО, зокрема: синтез високотемпературних оксидів і сполук відбувається на поверхні металевго анода в об'ємі водного електроліту при нормальному тиску і середній температурі до $50-60^{\circ}C$ від декількох до десятків хвилин; можливість обробляти вироби складної геометричної форми; висока адгезія між покриттям і оброблюваним металом; утворення між металом й каталітичноактивним шаром підслою оксиду оброблюваного металу, що виконує функції вторинного носія каталізатору; можливість відновлення властивостей каталізатора шляхом повторної обробки виробу; висока технологічність та відносно низька вартість ПЕО-процесу.

Процеси, що ініціюються електричними розрядами на поверхні вентильних металів і сплавів (зокрема Ti), дозволяють в одну стадію отримувати поруваті шари товщиною від кількох до сотень мікрон, що складаються не тільки з оксиду оброблюваного металу, але і включають до складу сполуки основних компонентів електроліту. Властивості ПЕО-покриттів визначаються їх складом і структурою, які, в свою чергу, залежать від матеріалу основи, складу електроліту та режиму обробки [11,13]. У цілому, плазмо-електролітна обробка титану дозволяє формувати функціональні гетерооксидні покриття різного призначення, що

дозволяє суттєво розширити область їх застосування, зокрема для каталізу та фотокаталізу.

Введення оксидів вольфраму до складу гетерооксидних шарів під час ПЕО [14] сприяє підвищенню активності синтезованої каталітичної системи $Ti | TiO_2 \cdot W_xO_y$, що обумовлює перспективність її використання у фотокаталізі.

Дослідження, спрямовані на розвиток методу ПЕО для отримання на металах і сплавах як оксидних носіїв, так і каталітично активних систем певного хімічного складу, є науково і практично значущими та сприяють розробці нових й перспективних технічних рішень у галузі хімічних технологій.

Результати та їх обговорення

Плазмо-електролітним оксидуванням зразків сплавів титану на їх поверхні синтезовано гетерооксидне $Ti | TiO_2 \cdot W_xO_y$ покриття. Формувальні залежності синтезу гетерооксидного шару (рис. 2) у всіх електролітах мають аналогічну форму, проте дещо відрізняються від класичного вигляду. Зростання напруги формування на початковій стадії процесу надзвичайно уповільнено. Вочевидь, такий характер формувальної залежності $U-t$ пов'язаний із конкуренцією процесів формування фазового оксиду титану та його хімічним розчиненням.

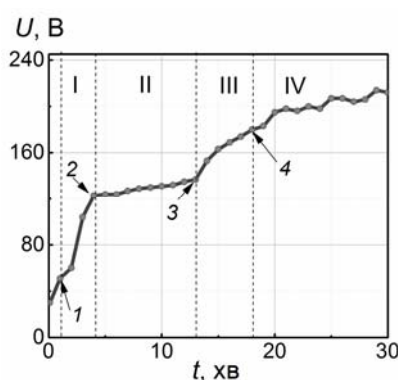


Рис. 2 – Формувальна залежність $U-t$ плазмо-електролітного формування покриття $TiO_2 \cdot W_xO_y$ в дифосфатно-боратному електроліті.

Після досягнення напруги 55–60 В (точка 1) спостерігається різкий практично лінійний підйом в області I до напруги 120–125 В (точка 2), що відповідає формуванню оксидного шару TiO_2 . Після цього зростання напруги знову значно сповільнюється. На формувальній залежності виникає плато в області II, яке можна охарактеризувати як період стабілізації. Під час зазначеного періоду перебігають реакції утворення та заліковування дефектів покриття, у тому числі й за участю компонентів електроліту.

По досягненню напруги 135–140 В (точка 3) настає третій пробій оксидної плівки, за яким процес ПЕО переходить у режим іскріння (область III). У

зазначеному режимі напруга ПЕО зростає до 170–180 В, на оксидованій ділянці зразка з'являється множина дрібних іскор, що переміщуються поверхнею. Режим іскріння після 18 хв. ПЕО (точка 4) змінюється мікродуговим режимом (область IV), що характеризується значною кількістю осциляцій напруги із загальним трендом її підвищення до 200–220 В. Вочевидь, це обумовлено з перебігом процесів включення до складу синтезованого покриття компонентів електроліту, що утворюють сполуки різних ступенів окиснення й, відповідно, питомого опору й термічної стійкості (табл. 1).

Таблиця 1 – Параметри напруги під час ПЕО поршневих сплавів алюмінію

| Оксид | Питомий електричний опір ρ (Ом·см) при 293 К | Термічна стійкість |
|--------|---|---|
| WO_2 | $3 \cdot 10^{-3}$ напівпровідник p -типа | $T > 2150$ $3WO_2 \rightarrow W + 2WO_3$ |
| WO_3 | $10^3 - 10^5$ напівпровідник | При температурі вище 1098 К відбувається возгонка |

Залежність швидкості зміни напруги формування ($dU/dt-U$) для синтезованого гетерооксидного покриття (рис. 3) в доіскровій області характеризуються незначним спадом з мінімумом в області значень напруги 45–50 В, що пов'язано із перебігом процесів формування і розчинення оксидів титану.

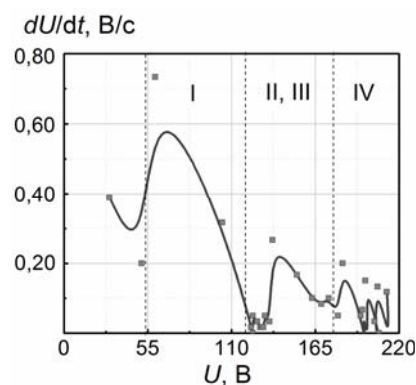


Рис. 3 – Залежність швидкості зміни напруги формування гетерооксидного покриття $TiO_2 \cdot W_xO_y$

З підвищенням напруги (область I) спостерігається стрімке зростання швидкості зміни напруги, що відображає переважання реакції утворення і збільшення маси оксиду над його розчиненням. Подальше зниження величини dU/dt (області II, III), ймовірно, є наслідком пробою оксидної плівки, а також перебігу супутніх йому

процесів інкорпорації компонентів електроліту та їх високотемпературних перетворень в зоні іскріння.

Для мікродугового режиму (область IV) характерним є нестабільність процесу окисдування і наявність значної кількості осциляцій dU/dt , що пов'язано з конкуренцією і стохастичним розподілом процесів пробою/заліковування під час синтезу складної гетерооксидної системи.

Одержані результати корелюють з даними для плазмо-електролітних покриттів з іншими металами-допантами [15,16].

Синтезоване покриття є вельми рівномірним та низькопоруватим (рис. 4). Утворений гетерооксидний шар має трубчасту тороподібну структуру, характерну для оксидів титану.

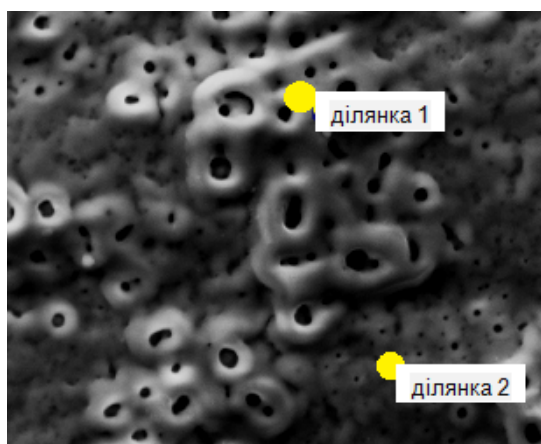


Рис. 4 – Морфологія поверхні гетерооксидного покриття $TiO_2 \cdot W_xO_y$. Збільшення $\times 1000$.

Аналіз хімічного складу одержаного гетерооксидного шару свідчить про диференційований розподіл тугоплавкого компоненту по поверхні. На виступах покриття (ділянка 1) він є вищим, ніж в упадинах (ділянка 2) та варіюється у межах 2,5–7,5 мас. %.

Факторами впливу на вміст тугоплавкого компоненту будуть зміна концентрації вольфраматів у робочому електроліті, варіювання густини та часу плазмо-електролітного окисдування [13].

Прогнозовано кількісний склад гетерооксидного шару у сукупності з морфологією його поверхні створюють передумови високої каталітичної активності синтезованого покриття $TiO_2 \cdot W_xO_y$.

Для визначення оптимальних умов синтезу ПЕО-покриттів та тестування властивостей одержаних функціональних матеріалів доцільно використовувати класичний кортеж «умови синтезу \rightarrow склад \rightarrow структура \rightarrow властивості», що в сукупності визначає напрям та складає основу подальших досліджень щодо розробки фотокаталітичних матеріалів на основі системи $Ti | TiO_2 \cdot W_xO_y$ для детоксикації середовищ від забруднювальних речовин техногенного походження.

Висновки

Проведено огляд особливостей перебігу фотокаталітичних процесів та визначено механізм каталітичної дії оксидних систем на основі TiO_2 . Описано сутність фотокаталітичного процесу окиснення токсикантів під дією УФ-випромінювання (λ 320–400 нм).

Проведено аналіз існуючих вимог до каталітичних матеріалів для фотокаталізу. Встановлено, що основними з них є хімічна та біологічна інертність, фотокаталітична стабільність та активність, невисока собівартість. Показано, що найбільш раціональним є нанесення (синтез) каталітичного шару на структурованих металевих підкладах.

Доведено, що ефективно формувати каталітичні оксидні системи можна методом ПЕО у водних електролітах з додаванням сполук металів-допанта, що підвищують фотокаталітичну активність одержаних гетерооксидних систем. Як цільовий допанта обрано оксиди вольфраму змінної валентності.

Досліджено кінетичні закономірності процесу ПЕО титану ВТ1-0 у дифосфатно-боратному електроліті із додаванням вольфраматів. Показано, що за густини струму 1,0 А/дм² протягом 30 хв формується рівномірне покриття $TiO_2 \cdot W_xO_y$ із трубчастою тороподібною структурою та вмістом вольфраму 2,5–7,5 мас. %. Прогнозовано синтезоване гетерооксидне покриття буде мати високу фотокаталітичну активність у знешкодженні токсичних агентів.

Список літератури

- Low J., Yu J., Jaroniec M., Wageh S., Al-Ghamdi A. A. Heterojunction Photocatalysts. *Adv. Mater.* 2017. Vol. 29. 1601694. doi: 10.1002/adma.201601694.
- Anpo M., Kamat P. V. *Environmentally Benign Photocatalysts: Applications of Titanium Oxide-based Materials*. Springer Science, 2010. 643 p.
- Lin L., Chai Y., Zhao B., Wei W., He D., He B., Tang Q. Photocatalytic oxidation for degradation of VOCs. *Open J. Inorg. Chem.* 2013. Vol. 3. No. 1. P. 14–25. doi: 10.4236/ojic.2013.31003.
- Linsebigler A. L., Lu G., Yates J. T. Photocatalysis on TiO_2 Surfaces: Principles, Mechanisms, and Selected Results. *Chem. Rev.* 1995. Vol. 95. P. 735–758. doi: 10.1021/cr00035a013.
- Hashimoto K., Irie H., Fujishima A. TiO_2 Photocatalysis: A Historical Overview and Future Prospects. *Japan. J. Appl. Phys.* 2005. Vol. 44. No. 12. P. 8269–8285. doi:10.1143/JJAP.44.8269.
- Zhao X., Zhu Y., Wang Y., Zhu L., Yang L., Sha Z. Influence of Anodic Oxidation Parameters of TiO_2 Nanotube Arrays on Morphology and Photocatalytic Performance. *J. Nanomat.* 2015. Vol. 2015. 104193. doi: 10.1155/2015/104193.
- Berdahl P., Akbari H. Evaluation of Titanium Dioxide as a Photocatalyst for Removing Air Pollutants. *California Energy Commission, PIER Energy-Related Environmental Research Program*, 2008. 33 p.

8. Kandiell T., Robben L., Alkaimad A., Bahnemann D. Brookite versus anatase TiO₂ photocatalysts: phase transformations and photocatalytic activities. *Photochem. Photobiol. Sci.* 2013. Vol. 12. No 4. P. 602–609. doi: 10.1039/C2PP25217A.
9. Fujishima A., Hashimoto K., Watanabe T. *TiO₂ Photocatalysis: Fundamentals and Applications*. BKC. Tokyo, 1999. 176 p.
10. Woolerton T. W., Sheard S., Reisner E., Pierce E., Ragsdale S. W., Armstrong F. A. Efficient and Clean Photoreduction of CO₂ to CO by Enzyme-Modified TiO₂ Nanoparticles Using Visible Light. *J. Amer. Chem. Soc.* 2010. Vol. 132. P. 2132–2133. doi: 10.1021/ja910091z.
11. Sakhnenko N., Ved' M., Karakurkchi A. Effect of doping metals on the structure of PEO coatings on Titanium. *Intern. J. Chem. Engin.* 2018. Vol. 2018. 4608485. doi: 10.1155/2018/4608485.
12. Gong D., Grimes C. A., Varghese O. K. Titanium oxide nanotube arrays prepared by anodic oxidation. *Mater. Res. Soc.* 2011. Vol. 16. No. 12. P. 3331–3334. doi: 10.1557/JMR.2001.0457.
13. Gupta P., Tenhundfeld G., Daigle E. O., Ryabkov D. Electrolytic plasma technology: Science and engineering – An overview. *Surf. Coat. Technol.* 2007. Vol. 201, No. 21. P. 8746–8760. doi: 10.1016/j.surfcoat.2006.11.023.
14. Dohcevic-Mitrovic Z., Stojadinovic S., Lozzi L., Askrabic S., Rosic M., Tomic N., Paunovic N., Lazovic S., Nikolic MG, Santucci S. WO₃/TiO₂ composite coatings: Structural, optical and photocatalytic properties. *Mater. Res. Bull.* 2016, Vol. 83. P. 217–224. doi: 10.1016/j.materresbull.2016.06.011.
15. Karakurkchi A. V., Sakhnenko M. D., Ved M. V., Gorohivskiy A. S., Galak O. V., Menshov S. M., Matykin O. V. Cobalt and manganese oxide catalytic systems on valve metals in ecotechnologies. *Promising Materials and Processes in Applied Electrochemistry: monograph*. Kyiv : KNUTD, 2017. P. 214–223.
16. Sakhnenko M., Karakurkchi A., Galak A., Menshov S., Matykin O. Examining the formation and properties of TiO₂ oxide coatings with metals of iron triad. *East-Europ. J. Enterpr. Technol.* 2017. Vol. 2. No 11(86). P. 4–10. doi: 10.15587/1729-4061.2017.97550.
17. Kandiell T., Robben L., Alkaimad A., Bahnemann D. Brookite versus anatase TiO₂ photocatalysts: phase transformations and photocatalytic activities. *Photochem. Photobiol. Sci.*, 2013, Vol. 12, no. 4, pp. 602–609, doi: 10.1039/C2PP25217A.
18. Hashimoto K., Irie H., Fujishima A. TiO₂ Photocatalysis: A Historical Overview and Future Prospects. *Japan. J. Appl. Phys.*, 2005, vol. 44, no. 12, pp. 8269–8285, doi: 10.1143/JJAP.44.8269.
19. Zhao X., Zhu Y., Wang Y., Zhu L., Yang L., Sha Z. Influence of Anodic Oxidation Parameters of TiO₂ Nanotube Arrays on Morphology and Photocatalytic Performance. *J. Nanomat.*, 2015, vol. 2015, 104193, doi: 10.1155/2015/104193.
20. Berdahl P., Akbari H. *Evaluation of Titanium Dioxide as a Photocatalyst for Removing Air Pollutants*. California Energy Commission, PIER Energy-Related Environmental Research Program, 2008, 33 p.
21. Kandiell T., Robben L., Alkaimad A., Bahnemann D. Brookite versus anatase TiO₂ photocatalysts: phase transformations and photocatalytic activities. *Photochem. Photobiol. Sci.*, 2013, Vol. 12, no. 4, pp. 602–609, doi: 10.1039/C2PP25217A.
22. Fujishima A., Hashimoto K., Watanabe T. *TiO₂ Photocatalysis: Fundamentals and Applications*. BKC. Tokyo, 1999, 176 p.
23. Woolerton T. W., Sheard S., Reisner E., Pierce E., Ragsdale S. W., Armstrong F. A. Efficient and Clean Photoreduction of CO₂ to CO by Enzyme-Modified TiO₂ Nanoparticles Using Visible Light. *J. Amer. Chem. Soc.*, 2010, Vol. 132, pp. 2132–2133, doi: 10.1021/ja910091z.
24. Sakhnenko N., Ved' M., Karakurkchi A. Effect of doping metals on the structure of PEO coatings on Titanium. *Intern. J. Chem. Engin.*, 2018, Vol. 2018, 4608485, doi: 10.1155/2018/4608485.
25. Gong D., Grimes C. A., Varghese O. K. Titanium oxide nanotube arrays prepared by anodic oxidation. *Mater. Res. Soc.* 2011, Vol. 16, no. 12. pp. 3331–3334, doi: 10.1557/JMR.2001.0457.
26. Gupta P., Tenhundfeld G., Daigle E. O., Ryabkov D. Electrolytic plasma technology: Science and engineering – An overview. *Surf. Coat. Technol.*, 2007, Vol. 201, no. 21, pp. 8746–8760, doi: 10.1016/j.surfcoat.2006.11.023.
27. Dohcevic-Mitrovic Z., Stojadinovic S., Lozzi L., Askrabic S., Rosic M., Tomic N., Paunovic N., Lazovic S., Nikolic MG, Santucci S. WO₃/TiO₂ composite coatings: Structural, optical and photocatalytic properties. *Mater. Res. Bull.*, 2016, Vol. 83, pp. 217–224, doi: 10.1016/j.materresbull.2016.06.011.
28. Karakurkchi A. V., Sakhnenko M. D., Ved M. V., Gorohivskiy A. S., Galak O. V., Menshov S. M., Matykin O. V. Cobalt and manganese oxide catalytic systems on valve metals in ecotechnologies. *Promising Materials and Processes in Applied Electrochemistry: monograph*. Kyiv : KNUTD, 2017, p. 214–223.
29. Sakhnenko M., Karakurkchi A., Galak A., Menshov S., Matykin O. Examining the formation and properties of TiO₂ oxide coatings with metals of iron triad. *East-Europ. J. Enterpr. Technol.* 2017, Vol. 2, no. 11 (86), pp. 4–10, doi: 10.15587/1729-4061.2017.97550.

References (transliterated)

Відомості про авторів (About authors)

Сакненко Микола Дмитрович – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри фізичної хімії, м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-5525-9525; e-mail: sakhnenko@kpi.kharkov.ua.

Mykola Sakhnenko – Doctor of Technical Sciences, Professor, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Head of the Department of Physical Chemistry, Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-5525-9525; e-mail: sakhnenko@kpi.kharkov.ua.

Інди́ков Сергі́й Микола́йович – аспірант кафедри фізичної хімії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0001-9156-3324; e-mail: serj86483@gmail.com.

Serhii Indykov – postgraduate, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Department of Physical Chemistry, Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0001-9156-3324; e-mail: serj86483@gmail.com.

Каракуркчі Ганна Володимирівна – доктор технічних наук, старший дослідник, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», начальник навчального відділу Військового інституту танкових військ, м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-1287-3859; e-mail: anyutikukr@gmail.com.

Hanna Karakurkchi – Doctor of Technical Sciences, Senior researcher, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Head of the Training Department of the Military Institute of Armored Forces, Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-1287-3859; e-mail: anyutikukr@gmail.com.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Сахненко М. Д., Інди́ков С. М., Каракуркчі Г. В. Застосування плазмо-електролітних покриттів на титані з тугоплавкими металами для детоксикації середовищ від забруднювальних речовин техногенного походження. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». 2021. № 1 (7). – С. 96-102. – doi:10.20998/2413-4295.2021.01.14.

Please cite this article as:

Sakhnenko M., Indykov S., Karakurkchi H. Application of plasma-electrolyte coatings on titanium with refractory metals for detoxification of environments from polluting substances. *Bulletin of the National Technical University “KhPI”. Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU “KhPI”, 2021, no. 1 (7), pp. 96-102, doi:10.20998/2413-4295.2021.01.14.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Сахненко Н. Д., Индыков С. Н., Каракуркчи А. В. Применение плазменно-электролитных покрытий на титане с тугоплавкими металлами для детоксикации сред от загрязняющих веществ техногенного происхождения. *Вестник Национального технического университета «ХПИ». Серия: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». 2021. № 1 (7). С. 96-102. – doi:10.20998/2413-4295.2021.01.14.

АННОТАЦІЯ На основі проведеного обзора особливостей фотокаталітичних процесів визначені особливості каталітичного дії оксидних систем на основі діоксида титана. Показано, що TiO_2 є одним із самих хімічно і термічно стабільних, а також нетоксичних неорганічних оксидів напівпровідників, фотокаталітична активність якого проявляється при облученні ультрафіолетовою частиною спектра (λ 320–400 нм) і дозволяє окисляти значительне количество токсичних агентів до води і вуглекислого газу. Розглянуто суть фотокаталітичного процесу окислення токсикантів під дією УФ-випромінювання на поверхності TiO_2 . Предложена технологія фотокаталітичної детоксикації забруднюючих агентів є економічно доступною, екологічно чистою і дає можливість широкого застосування, в частині в автономних системах, в т.ч. подвійного призначення. Встановлено, що основними вимогами до матеріалів для фотокатализа є їх хімічна і біологічна інертність, фотокаталітична стабільність і активність, невисока собівартість. Показано, що найбільш раціональною технологічною формою фотокатализатора є нанесення (синтез) каталітичного шару на структурованих металевих підложках, в частині сплавах титана. Доведено, що ефективно формувати зазначені каталітичні оксидні системи можна методом плазменно-електролітного окиснення в водних електролітах з додаванням сполучень металів-допантів, підвищуючих фотокаталітичну активність отриманих гетерооксидних систем. Як цільовий допант пропонується використовувати оксиди вольфраму змінної валентності. Досліджено кінетичні закономірності процесу плазменно-електролітного окиснення титана ВТІ-0 в дифосфатно-боратному електроліті з додаванням вольфраматів. Показано, що в електроліті цього типу при щільності струму 1,0 А/дм² в гальваностатичному режимі впродовж 30 хв утворюється рівномірне покриття $TiO_2 \cdot W_xO_y$ з трубчастою тороподібною структурою і вмістом вольфраму 2,5–7,5 мас. %. Прогнозований кількісний склад гетерооксидного шару в сукупності з морфологією поверхні створює передумови високої каталітичної активності синтезованого покриття для детоксикації серед от забруднюючих речовин техногенного походження.

Ключові слова: плазменно-електролітне окиснення; сплав титана; фотокаталітичне покриття; вольфрамсодержаче оксидне покриття

Надійшла (received) 03.03.2021

УДК 621.317.2

doi:10.20998/2413-4295.2021.01.15

УСТАНОВКА ДЛЯ ВИПРОБУВАННЯ ТРАНСФОРМАТОРНОЇ ОЛИВИ УИМ – 90 З ЕЛЕКТРОННИМ БЛОКОМ ПІДЙОМУ НАПРУГИ

**І. М. БОГАТИРЬОВ¹, О. Г. ПОНУЖДАЄВА^{2*}, Д. Г. КОЛУШКО³, С. С. РУДЕНКО^{2*},
О. Є. ІСТОМІН⁴**

Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", м. Харків, УКРАЇНА:

¹ кафедра електричних станцій

² науково-дослідний та проєктно - конструкторський інститут "Молнія"

³ кафедра автоматизованих електромеханічних систем

⁴ кафедра інформаційних технологій і систем колісних та гусеничних машин ім. О. О. Морозова

*e-mail: nio5_molniya@ukr.net

АНОТАЦІЯ Для проведення випробувань відповідно до методики визначення пробивної напруги рідких діелектриків використовуються високовольтні установки, основними частинами яких є високовольтний трансформатор, блок підйому напруги, випробувальна комірка з електродами та ін. Описано установку для випробування трансформаторної оливи УИМ – 90 з електромеханічним блоком підйому напруги. У зв'язку з жорсткими вимогами нормативних документів до форми синусоїди напруги на електродах комірки, проведено натурні випробування УИМ – 90, які дозволяють оцінити вплив якості мережевої напруги на спотворення випробувальної напруги та точність вимірювань. Виявлено, що при використанні електромеханічного блоку підйому напруги перепади напруги мережі спотворюють форму синусоїди пропорційно коефіцієнту трансформації підвищувального трансформатора. Проведеним аналізом конструкції цього блоку виявлено, що використання ЛАТРа та механічного регулятора напруги може викликати додаткові спотворення форми синусоїди. Прийнято рішення про розробку електронного блоку підйому напруги, який дозволить виключити вплив мережі на результати випробувань. Створено алгоритм формування сигналу від мікроконтролера, що генерує лінійно наростаючу напругу, до підсилювача, який являє собою широтно-імпульсний модулятор, далі, до каскаду підвищувальних трансформаторів. Запропоновано використовувати додатковий трансформатор для узгодження рівнів вихідної напруги підсилювача та вхідної напруги основного підвищувального трансформатора. Наведено функціональну схему УИМ – 90 з електронним блоком підйому напруги та каскадним включенням підвищувальних трансформаторів. Наведені осцилограма напруги та її спектрограма на первинній обмотці основного трансформатора, отримані в результаті реалізації розробленого електронного блоку підйому напруги, демонструють незалежність форми синусоїди напруги від якості мережі. Проаналізувавши технічні характеристики модернізованого УИМ – 90 та світових аналогів, можна зробити висновок про його конкурентоспроможність на міжнародному рівні.

Ключові слова: рідкий діелектрик; напруга пробою; підвищувальний трансформатор; широтно-імпульсний модулятор; напруга мережі; випробувальна установка

DIELECTRIC OIL'S TEST MACHINE WISH VOLTAGE RISE ELECTRONIC MODULE

I. BOGATIROV¹, H. PONUZHDAYEVA², D. KOLIUSHKO³, S. RUDENKO², A. ISTOMIN⁴

National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, UKRAINE :

¹ Department of Electric Power Stations

² Research and Design Institute "Molniya"

³ Department of Automated electromechanics systems

⁴ Department of Information Technologies and Systems of Wheeled and Tracked Vehicles named after A.A. Morozov

ABSTRACT For test operations according to the liquid dielectric breakdown voltage measurement method we use high voltage machines that consist of high-voltage step-up transformer, voltage rise block, test cell with electrodes and so on. Described dielectric oil's test machine UIM – 90 with electromechanical voltage rise block. Cause of hard requirements in specification documents about voltage sine wave form on cell's electrodes, we performed field tests for UIM – 90 that help to evaluate the mains voltage impact on the test voltage distortion and measurement accuracy. Was discovered that during usage of electromechanical voltage rise block voltage steps disrupt sine wave's form proportionally to step-up transformer's transformation coefficient. Performed analysis of this block's construction and established that usage of LATP and mechanical voltage controller could lead to additional sine's wave disruption. Decided to develop electronic voltage rise block which will allow to get rid of mains influence on test data. Created the algorithm of wave shaping from microcontroller, which generates voltage ramp to the amplifier representing pulse width modulator, then to the step-up transformers cascade. Proposed to use additional transformer for level matching of amplifier's output voltage and main high voltage transformer's input voltage. Presented flow sheet for UIM – 90 with electronic voltage step-up block and cascading start of step-up transformers. Provided voltage oscillograph trace and it spectrograph on the main transformer's primary side, received due to the implementation of developed electronic voltage step-up block, prove that voltage sine wave form doesn't rely on mains quality. After upgraded UIM – 90 and it world analogues technical parameters analysis we could make a conclusion about it competitive capability on global level.

Keywords: liquid dielectric; breakdown voltage; step-up transformer; pulse width modulator; mains voltage; test machine

Постановка проблеми

Визначення електричної міцності рідких діелектриків необхідно для контролю якості

ізоляційних матеріалів, що застосовуються в процесі експлуатації високовольтного обладнання, що наповнене оливою (наприклад, силових та

вимірювальних трансформаторів, комутаційних апаратів, перетворювачів). Зниження або втрата діелектричних властивостей може привести до виходу з ладу дороговартісного обладнання, а також до призупинення електропостачання підприємств та населення. Проведення електричного, хімічного та хроматографічного аналізу оливи дає інформацію про стан обладнання, наповненого нею [1-3].

Основним показником електричної якості оливи є напруга пробою. Методика визначення пробивної напруги $U_{пр}$ за допомогою спеціальних випробувальних високовольтних установок (ВВУ) для рідких електроізоляційних матеріалів як натуральних, так і синтетичних, регламентована в [4,5]. Зазначені ВВУ мають забезпечувати точність вимірювань, надійність та тривалий термін служби, зручність та безпеку експлуатації. Як правило, такі ВВУ працюють на промисловій частоті та містять: високовольтний підвищувальний трансформатор, регулятор напруги, пристрій для перемішування рідких діелектриків, систему управління, випробувальна комірочка з електродами. В теперішній час як вітчизняними, так і закордонними фірмами випускаються різні ВВУ для визначення $U_{пр}$, наприклад: OTS 80, OTS 100 («Megger», Велика Британія) [6], DTA 100 C («BAUR», Австрія) [7], АИМ – 90А («Медрентех», Росія), OLT – 90А/М (ООО «Харківенергоприлад, Україна) та ін.

Також користується попитом в Україні, країнах далекого та близького зарубіжжя установка для випробування оливи УИМ – 90, розроблена в 2001 р. НДПКІ "Молнія" НТУ "ХПІ", м. Харків, Україна, яка продовжує безперервно удосконалюватися [8].

Сучасний прилад, представлений на рис. 1, має електронне управління, повністю автоматичний режим роботи (від витримки часу після заповнення комірочки до обробки результатів випробувань), енергонезалежну пам'ять, де зберігаються всі налаштування попередніх випробувань, оперативну пам'ять для збереження результатів останнього випробування, безшумний автоматизований пристрій перемішування зразка рідкого діелектрика в випробувальній комірочці. Також установка має можливість приєднання до ПК або смартфона для подальшої обробки результатів випробувань за допомогою блока безпроводного зв'язку Bluetooth [9]. Вибір такого інтерфейсу дозволяє підключити 8 установок одночасно до одного ПК та керувати ними за допомогою розробленого програмного комплексу Virtual UIM [10].

Однією з основних частин ВВУ для визначення $U_{пр}$ є блок підйому напруги (БПН), що живить високовольтний підвищувальний трансформатор.

В УИМ – 90 в якості джерела живлення високовольтного трансформатора використовується автотрансформатор АОСН – 2 – 220 (ЛАТР) з системою електромеханічного регулювання, який забезпечує підйом напруги на електродах випробувальної комірочки зі швидкістю 2 кВ/с. Вхід



Рис. 1 – Зовнішній вигляд установки УИМ – 90

вказаного джерела підключений до промислової мережі, синусоїдальність якої не завжди відповідає нормованим параметрам. Документ [5] регламентує, що напруга на електродах ВВУ має змінюватись по синусоїдальному закону з коефіцієнтом амплітуди $1,41 \pm 0,07$, проте, для виконання цієї вимоги необхідно, щоб напруга мережі відповідала нормованим характеристикам. Застосування ЛАТРа з регулятором напруги має істотний недолік: наявність похибки при визначенні $U_{пр}$ рідких діелектриків, викликані відхиленням напруги, що подається на електроди випробувальної комірочки, від синусоїдальної форми.

Мета роботи

Метою роботи є створення БПН, що дозволить виключити вплив мережі на результати випробувань та підвищити точність визначення $U_{пр}$ рідкого діелектрика.

Матеріали дослідження

При розробці зазначеного блоку необхідно було обрати спосіб підйому напруги для отримання синусоїди з низьким рівнем гармонік та розробити схему вимірювання $U_{пр}$. У процесі проведення експериментів було виявлено, що різкі перепади напруги мережі змінного струму передаються на вихід високовольтного трансформатора пропорційно коефіцієнту трансформації та спотворюють результати визначення $U_{пр}$ діелектрика. Дискретність підвищення напруги при використанні ЛАТРа також впливає на "чистоту" синусоїди. На рис. 2, а наведена осцилограма напруги на первинній обмотці підвищувального високовольтного трансформатора. Представлена на рис. 2, б спектрограма демонструє присутність 3-ої, 5-ої, 7-ої, 9-ої та інших гармонік, коефіцієнт нелінійних спотворень перевищує 3%. Якщо врахувати вплив комутаційних завад мережі, що проникають крізь ЛАТР на первинну обмотку підвищувального високовольтного трансформатора, то за час випробування однієї проби оливи в різні моменти часу коефіцієнт нелінійних спотворень може перевищувати 10%, що значно вплине на результат випробування.

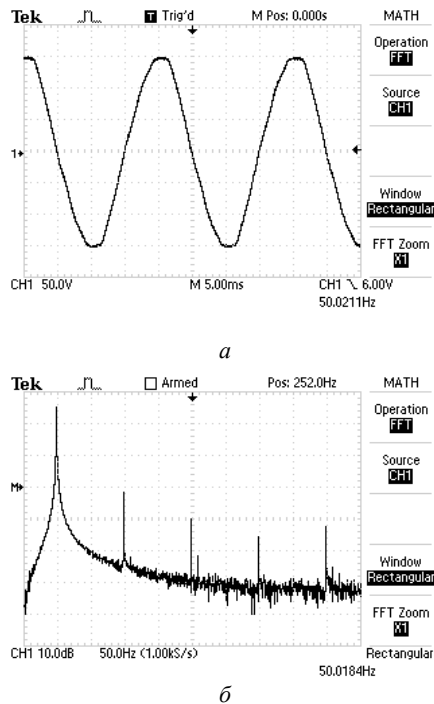


Рис. 2 – Осцилограма напруги на виводах первинної обмотки високовольтного підвищувального трансформатора установки УИМ – 90 з електромеханічним БПН (а) та її спектрограма (б)

Крім того, в процесі використання електромеханічного регулятора напруги спостерігається іскріння між рухливим графітовим контактом та обмоткою ЛАТРа, що також впливає на якість синусоїди та є джерелом завад. До того ж механічні елементи регулятора напруги при використанні ЛАТРа ненадійні. Тому було прийнято рішення про розробку електронного БПН, що формує синусоїдальну напругу в діапазоні від 0 до 250 В.

Основним елементом цього блоку є мікроконтролер, у функції якого входить генерація лінійно наростаючої синусоїдальної напруги, фіксація моменту пробую та розрахунок діючого значення $U_{пр}$ досліджуваного діелектрика. Крім цього, мікроконтролер забезпечує (в автоматичному режимі) витримку всіх часових нормативів, що стосуються перемішування та відстоювання досліджуваної рідини. Сигнал від мікроконтролера подається на вхід підсилювача, що являє собою широтно-імпульсний модулятор (ШИМ) з мостовим вихідним каскадом, працюючим на частоті 400...700 кГц. Використання підсилювача класу D дозволяє виключити вплив коливань мережевої напруги, що подається на каскад підвищувальних трансформаторів, так як її форма та амплітуда залежать лише від сигналу, що подається на вхід підсилювача від мікроконтролера. Для заглушення несучої частоти ШИМ на виході підсилювача встановлений фільтр низьких частот другого порядку. Використання фільтра виключає проникнення високочастотних імпульсних коливань в ланцюг формування випробувальної напруги, що

прикладається до електродів через ємнісні зв'язки обмоток трансформаторів.

Функціональна схема УИМ – 90 з розробленим БПН, що зображена на рис. 3, складається з: мікроконтролера 1, джерела живлення 2, підсилювача низької частоти 3 класу D, що містить фільтр 4, двокаскадного підвищувального трансформатора 5, 6. Також до складу установки входить, пристрій 7 для перемішування рідких діелектриків, випробувальна комірка 8 з електродами, датчик реєстрації пробую 9, блок управління 10, реєстратор результатів вимірювання 12 з дисплеєм 11.

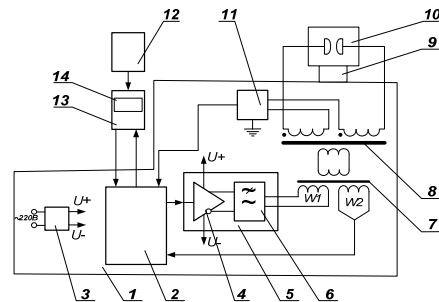


Рис. 3 – Функціональна схема УИМ – 90 з електронним БПН

Особливістю схеми є те, що вихідний мостовий каскад підсилювача 3 живиться від стабілізованого по амплітуді джерела живлення 2, що виключає вплив коливань і завад мережевої напруги на форму та амплітуду напруги, яка прикладається до електродів комірки.

В цій схемі використане каскадне включення підвищувальних трансформаторів 5 та 6. Додатковий трансформатор 5 призначений для узгодження рівнів вхідної напруги основного трансформатора 6 (200 В) та вихідної напруги підсилювача 3 (24 В), що підключений до первинної обмотки W1. Окрім того на трансформаторі 5 розміщена вимірювальна обмотка W2, яка необхідна для вимірювання та обчислення поточного діючого значення напруги на електродах комірки 8. Основний трансформатор 6 забезпечує підйом випробувальної напруги до 90 кВ (по запиті замовника до 100 кВ) [11]. Використання каскадного включення підвищувальних трансформаторів дозволяє значно зменшити (в 1,5–2 рази) коефіцієнт трансформації $K_{тр}$ основного підвищувального трансформатора 6 (зазвичай, в таких пристроях $K_{тр} > 400$), що призведе до покращання його енергетичних характеристик. Датчик реєстрації пробую 9 призначений для генерації імпульсного сигналу в момент пробую рідини та підключений до протилежних відносно електродних кінців обмоток підвищувального трансформатора 6. Датчик має гальванічну розв'язку між високовольтним трансформатором 6 та іншими елементами схеми установки. Блок управління 10 дозволяє оператору задавати (змінювати) режими та керувати роботою установки, а реєстратор 12 фіксує результати

вимірювань. Результати випробування відображаються на дисплеї 11.

В результаті реалізації розробленого електронного БПН на первинній обмотці високовольтного трансформатора отримана синусоїдальна напруга, форма якої не залежить від якості мережі (див. рис. 4).

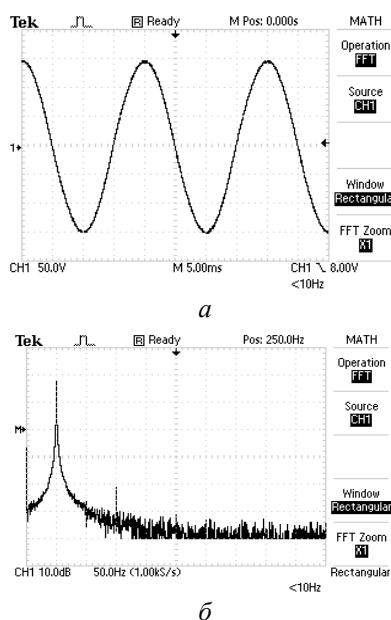


Рис. 4 – Осцилограма напруги на виводах первинної обмотки високовольтного підвищувального трансформатора установки УИМ – 90 з електронним БПН (а) та її спектрограма (б)

Представлені на осцилограмах (див. рис. 2 та рис. 4) рівні напруги відповідають 48...50 кВ діючого значення напруги на електродах випробувальної

комірки. На рис. 4, а показана осцилограма напруги на первинній обмотці підвищувального високовольтного трансформатора з електронним БПН. Форма напруги близька до синусоїди з нормованими параметрами, це підтверджує спектрограма 4, б. В спектрі сигналу присутні, переважно, тільки 3-я гармоніка, а сумарний коефіцієнт нелінійних спотворень не перевищує 1%. Проникнення комутаційних завад в мережу випробувальної напруги виключено за рахунок живлення вихідного каскаду підсилювача класу D стабільною напругою від спеціального джерела живлення постійного струму.

В результаті заміни електромеханічного БПН на електронний вага УИМ – 90 знизилась на 1,2 кг, споживана потужність – з 500 Вт до 100 Вт, що дозволяє розробити установку з автономним акумуляторним живленням.

Порівняння характеристик модернізованої установки УИМ – 90 та світових аналогів підтверджує її конкурентоспроможність на міжнародному рівні (див. табл. 1).

Аналізуючи технічні характеристики, можна відзначити, що УИМ – 90 має відносно невелику вагу, можливість підключення до ПК для управління та подальшої обробки результатів випробувань за допомогою блоку безпроводного зв'язку Bluetooth. Крім того, по запиту замовника УИМ – 90 може мати:
– вбудований пристрій для друку протоколу випробувань;
– максимальну випробувальну напругу 100 кВ.
Можливість управління процесом випробування за допомогою смартфона робить УИМ – 90 унікальним пристроєм серед провідних світових аналогів.

Таблиця 1 – Технічні характеристики УИМ – 90 та світових аналогів

| Назва пристрою | U, кВ | ІЕС 60156-2013 | Ручний режим | Друк чека | ПК | Смартфон | Маса, кг |
|-------------------------------|-------------|----------------|--------------|-----------|----------------|----------|----------|
| УИМ-90 (UA) | 90 (100*) | + | + | +(*) | Bluetooth | + | 27 |
| OLT-90A / M (UA) | 90 | + | + | + | USB | – | 25 |
| BA100 b2 electronic GmbH (AU) | 100 | + | + | + | Bluetooth, USB | – | 32 |
| Скат-М100В (RU) | 100 | – | + | + | USB | – | 41 |
| АИМ-90А (RU) | 90 | – | + | + | – | – | 33 |
| ZWJD111 (China) | 80 (100*) | – | + | + | USB | – | 40 |
| PORTATEST Type (Ge) | 60; 80; 100 | + | + | + | RS-232 | – | 45 |
| Megger (UK) OTS60/80/100AF | 60; 80; 100 | + | + | + | USB | – | 30 |
| DTA 100 C(AU) | 100 | + | + | + | USB | – | 39 |

Примітка : * – опціональні можливості

Висновки

Проаналізовано причини спотворень результатів визначення $U_{пр}$ рідких діелектриків в установках з електромеханічним БПН.

Розроблена та описана функціональна схема установки УИМ – 90 з електронним БПН.

Створений БПН дозволив отримати синусоїдальну форму випробувальної напруги, незалежної від якості мережі та стрибків напруги.

Авторами поданий пакет документів на отримання патенту України на корисну модель "Пристрій для випробування рідких діелектриків з електронним блоком підйому напруги".

Список літератури

1. Абдурахмонов С.У., Узаков Р., Зокирова И. З. Анализ работы установок для испытания трансформаторного масла на пробой. *Бюллетень науки и практики*. 2018. 4. № 3. С. 130-134.
2. Christian B., Gläser A. The behavior of different transformer oils relating to the generation of fault gases after electrical flashovers. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2017. V. 84. P. 261-266. doi: 10.1016/j.ijepes.2016.06.007.
3. Yang Q., Su P., Chen Y. Comparison of Impulse Wave and Sweep Frequency Response Analysis Methods for Diagnosis of Transformer Winding Faults. *Energies*. 2017. V. 10. №4. P. 431. doi: 10.3390/en10040431.
4. ГОСТ 6581–75 – *Материалы электроизоляционные жидкие. Методы электрических испытаний*.
5. IEC 60156-2013 – *Insulating liquids. Determination of the breakdown voltage at power frequency*.
6. Marković M., Štih Ž. New method for prediction of insulating liquid AC breakdown. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2017. Vol. 24. 1. P. 437-454. doi: 10.1109/TDEI.2016.005940.
7. Calcara L., Sangiovanni S., Pompili M. Standardized methods for the determination of breakdown voltages of liquid dielectrics. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2019. Vol. 26. 1. P. 101-106. doi: 10.1109/TDEI.2018.007685.
8. Колиушко Г. М., Пличко А. В., Понуждаева Е. Г. Создание установки для испытания масла УИМ – 90, этапы её модернизации. *Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Техніка та електрофізика високих напруг*. – Х.: НТУ "ХПІ". 2015. №36 (1208). С. 37–42.
9. Жинжиков В. М., Истомин А. Е., Колиушко Д. Г., Понуждаева Е. Г. Установка для испытания пробивного напряжения жидких диэлектриков с блоком радиоканала. *Енергетика та електрифікація*. 2017. №8-9. С. 68–71.

10. Истомин О. Е., Колиушко Д. Г., Понуждаева О. Г., Руденко С. С. Пристрій для випробування рідких діелектриків. Патент України на корисну модель № 138523. 2019.
11. Fayed M. M., Mansour D. A., Izzularab M. A. Dielectric Properties of Nanooil Impregnated Paper Insulation System, *2018 53rd International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*. Glasgow. 2018. P. 1-4. doi: 10.1109/UPEC.2018.8542098.

References (transliterated)

1. Abdurahmonov S., Uzakov R., Zokirova I. Analysis of the installations operation for testing transformer oil to breakdown. *Bulletin of Science and Practice*, 2018, 4, 3, 130-134.
2. Christian B., Gläser A. The behavior of different transformer oils relating to the generation of fault gases after electrical flashovers. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2017, Vol. 84, pp. 261-266, doi: 10.1016/j.ijepes.2016.06.007.
3. Yang Q., Su P., Chen Y. Comparison of Impulse Wave and Sweep Frequency Response Analysis Methods for Diagnosis of Transformer Winding Faults. *Energies*, 2017, Vol. 10, №4, pp. 431, doi: 10.3390/en10040431.
4. ГОСТ 6581–75 – *Materialy elektroizolyatsionnyie zhidkie. Metody elektricheskikh ispytaniy*.
5. IEC 60156-2013 – *Insulating liquids. Determination of the breakdown voltage at power frequency*.
6. Marković M., Štih Ž. New method for prediction of insulating liquid AC breakdown. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2017, Vol. 24, 1, pp. 437-454, doi: 10.1109/TDEI.2016.005940.
7. Calcara L., Sangiovanni S., Pompili M. Standardized methods for the determination of breakdown voltages of liquid dielectrics. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2019, Vol. 26, 1, pp. 101-106, doi: 10.1109/TDEI.2018.007685.
8. Koliushko G. M., Plichko A. V., Ponuzhdaeva E. G. Sozdanie ustanovki dlya ispytaniya masla UIM – 90, etapy eyo modernizacii, *Visnik NTU "HPI". Seriya: Tekhnika ta elektrofizika visokih naprug* – H.: NTU "HPI", 2015, № 36 (1208), pp. 37–42.
9. Hinzhiikov V. M., Istomin A. E., Koliushko D. G., Ponuzhdaeva E. G. Ustanovka dlya ispytaniya probivnogo napryazheniya zhidkih dielektrikov s blokom radiokanala. *Energetika ta elektrifikaciya*, 2017, №8-9, pp. 68–71.
10. Istomin O. Ye., Koliushko D. G., Ponuzhdayeva O. G., Rudenko S. S. Pry'strij dlya vy'probuvannya ridky'h dielektry'kiv. Patent Ukrayiny` na kory`snu model` № 138523. 2019.
11. Fayed M. M., Mansour D. A., Izzularab M. A. Dielectric Properties of Nanooil Impregnated Paper Insulation System, *2018 53rd International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, Glasgow, 2018, pp. 1-4, doi: 10.1109/UPEC.2018.8542098.

Відомості про авторів (About authors)

Богатирич Ігор Миколайович – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри електричних машин, м. Харків, Україна; e-mail: bogin@dergachi.net

Igor Bogatirov – Docent of the Department of Electric Power Stations, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; e-mail: bogin@dergachi.net

Понуждаєва Олена Геннадіївна – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач лабораторії Науково-Дослідного та проектно-конструкторського інституту "Молнія" м. Харків, Україна; e-mail: nio5_molniya@ukr.net

Helena Ponuzhdayeva – laboratory manager of Research and Design Institute "Molniya" National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; e-mail: nio5_molniya@ukr.net

Коліушко Денис Георгійович – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший науковий співробітник кафедри автоматизованих електромеханічних систем, м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0003-3112-4260; e-mail: nio5_molniya@ukr.net

Denis Koliushko – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Senior researcher, Senior researcher of the Department of Automated electromechanics systems, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0003-3112-4260; e-mail: nio5_molniya@ukr.net

Руденко Сергій Сергійович – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший науковий співробітник Науково-Дослідного та проектно-конструкторського інституту "Молнія", м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-2544-1545; e-mail: nio5_molniya@ukr.net

Serhii Rudenko – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Senior researcher of Research and Design Institute "Molniya" National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-2544-1545, e-mail: nio5_molniya@ukr.net

Істомін Олександр Євгенійович – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри інформаційних технологій і систем колісних та гусеничних машин ім. О. О. Морозова; ORCID: 0000-0002-5709-6459; e-mail: a.e.istomin@gmail.com.

Alexander Istomin – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Docent of she Department of Information Technologies and Systems of Wheeled and Tracked Vehicles named after A.A. Morozov, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine, ORCID: 0000-0002-5709-6459; e-mail: a.e.istomin@gmail.com.

Будь ласка, посилайтеся на цю статтю наступним чином:

Богатирьов І. М., Понуждаєва О. Г., Коліушко Д. Г., Руденко С. С., Істомін О. Є. Установка для випробування трансформаторної оливи УИМ – 90 з електронним блоком підйому напруги. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2021. № 1 (7). С. 103-108. doi:10.20998/2413-4295.2021.01.15.

Please cite this article as:

Bogatirov I., Ponuzhdayeva H., Koliushko D., Rudenko S., Istomin A. Dielectrics oil's test mashine wish voltage rice electronic modul. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2021, no. 1 (7), pp. 103-108, doi:10.20998/2413-4295.2021.01.15.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Богатырёв И. Н., Понуждаева Е. Г., Колиушко Д. Г., Руденко С. С., Истомин А. Е. Установка для испытания трансформаторного масла УИМ – 90 с электронным блоком подъёма напряжения. *Вестник Национального технического университета «ХПИ»*. Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». 2021. № 1 (7). С. 103-108. doi:10.20998/2413-4295.2021.01.15.

АННОТАЦІЯ Для проведення испытаний согласно методике определения пробивного напряжения жидких диэлектриков используются высоковольтные установки, основными частями которых являются высоковольтный повышающий трансформатор, блок подъёма напряжения, испытательная ячейка с электродами и др. Описана установка для испытания трансформаторного масла УИМ – 90 с электромеханическим блоком подъёма напряжения. В связи с жесткими требованиями нормативных документов к форме синусоиды напряжения на электродах ячейки, проведены натурные испытания УИМ – 90, позволяющие оценить влияние качества сетевого напряжения на искажение испытательного напряжения и точность измерений. Выявлено, что при использовании электромеханического блока подъёма напряжения скачки напряжения сети искажают форму синусоиды пропорционально коэффициенту трансформации повышающего трансформатора. Проведенным анализом конструкции этого блока установлено, что использование ЛАТРа и механического регулятора напряжения может вызвать дополнительные искажения формы синусоиды. Принято решение о разработке электронного блока подъёма напряжения, который позволит исключить влияние сети на результаты испытаний. Создан алгоритм формирования сигнала от микроконтроллера, который генерирует линейно нарастающее напряжение, к усилителю, который представляет собой широтно-импульсный модулятор, дальше, к каскаду повышающих трансформаторов. Предложено использовать дополнительный трансформатор для согласования уровней выходного напряжения усилителя и входного напряжения основного высоковольтного трансформатора. Представлена функциональная схема УИМ – 90 с электронным блоком подъёма напряжения и каскадным включением повышающих трансформаторов. Приведенные осциллограмма напряжения и её спектрограмма на первичной обмотке основного трансформатора, полученные в результате реализации разработанного электронного блока подъёма напряжения, демонстрируют, что форма синусоиды напряжения не зависит от качества сети. Проанализировав технические характеристики модернизированного УИМ – 90 и мировых аналогов, можно сделать вывод о его конкурентоспособности на международном уровне.

Ключевые слова: жидкий диэлектрик; напряжение пробоя; повышающий трансформатор; широтно-импульсный модулятор; напряжение сети; испытательная установка

Надійшла (received) 16.02.2021

ЗМІСТ

ЕНЕРГЕТИКА, МАШИНОБУДУВАННЯ ТА ТЕХНОЛОГІЇ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

- Батигін Ю. В., Єрємін О. Ф., Шиндерук С. О., Чаплигін Є. О., Бенсбаа Б. Е.** Плоский круговий соленоїд між масивними біфілярними котушками. Аналіз електромагнітних процесів 3
- Карпеченко А. А., Бобров М. М., Дубовий О. М., Макруха Т. О., Неделько Є. Ю.** Формування композиційних металокерамічних та металокарбідних електродугових покриттів 9
- Крилов Д. С., Холод О. І.** Вплив величини вхідної індуктивності на якісні показники роботи активного керованого випрямляча 18
- Кусий Я. М., Топільницький В. Г.** Визначення раціонального припуску на оброблення поверхонь заготовки за критерієм технологічної пошкоджуваності 24
- Сидорчук О. М.** Вплив термічної обробки на штампову сталь 4Х4Н5М4Ф2 та встановлення її фізико механічних властивостей 34

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ

- Вавіленкова А. І.** Аналіз гнучких методологій розробки програмного забезпечення для реалізації у командних проєктах 39
- Сокол Є. І., Колісник К. В., Бернадська Т. В.** Удосконалення методів тривимірної візуалізації для визначення морфологічних ознак фазових мікрооб'єктів 47
- Соларьов О. О., Мікуліна М. О., Таценко О. В.** Розрахунок пропускну здатності автомобільного потоку на транспортній розв'язці 54

ХІМІЧНІ ТА ХАРЧОВІ ТЕХНОЛОГІЇ, ЕКОЛОГІЯ

- Борисенко О. М., Логвінков С. М., Шабанова Г. М., Корогодська А. М., Іващура М. М., Іващура А. А.** Субсолідусна будова системи MgO – FeO – Al₂O₃ 59
- Горбачова О. Ю.** Обґрунтування можливості використання термомодифікованого шпону у середовищі з підвищеною вологою 65
- Мельник Ю. Р., Мельник С. Р., Магорівська Г. Я.** Трансестерифікація тригліцеридів рослинних олій головною фракцією етилового спирту 72
- Михайлова Є. О., Дейнека Д. М., Панчева Г. М.** Аналіз методів перероблення пластикових відходів 80
- Миць М. Г., Білошенко К. С., Божков А. І.** Дослідження щодо вдосконалення способу періодичної аерації стічних вод 90
- Сахненко М. Д., Індиков С. М., Каракуркчі Г. В.** Застосування плазмо-електролітних покриттів на титані з тугоплавкими металами для детоксикації середовищ від забруднювальних речовин техногенного походження 96

ЕЛЕКТРОФІЗИЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ, ЕМС ТА БЛИСКАВКОЗАХИСТ

- Богатирьов І. М., Понуждаєва О. Г., Коліушко Д. Г., Руденко С. С., Істомін О. Є.** Установа для випробування трансформаторної оливи УИМ – 90 з електронним блоком підйому напруги 103

CONTENTS

ENERGY, ENGINEERING AND STRUCTURAL MATERIALS TECHNOLOGY

- Batygin Yu., Yeryomina O., Shinderuk S., Chaplygin E., Bensbaa B. E.** Flat circular solenoid between massive bifilar coils. Analysis of electromagnetic processes 3
- Karpchenko A., Bobrov M., Dubovyy A., Makrukha T. Nedelko E.** Formation of composite metal-ceramic and metal-carbide electric arc sprayed coatings 9
- Krylov D., Kholod O.** The influence of the input inductance on the qualitative indicators of active controlled rectifier 18
- Kusyi Y., Topilnytskyu V.** Determination of the rational allowance for blank surface treatment by the criterion of technological damage 24
- Sydorchuk O. M.** Influence of heat treatment on die steel 4Kh4N5M4F2 and establishment of its physico-mechanical properties 34

INFORMATION TECHNOLOGY AND CONTROL SYSTEMS

- Vavilenkova A.** Analysis of flexible methodologies of software development for implementation in team projects 39
- Sokol Ye., Kolisnyk K., Bernadska T.** Improvement of three-dimensional visualization methods for determination of morphological features of phase microobjects 47

| | |
|--|-----|
| <i>Solarov O., Mikulina M., Tatsenko O.</i> Calculation of car traffic capacity at the crossroad | 54 |
| <i>CHEMICAL AND FOOD TECHNOLOGY, ECOLOGY</i> | |
| <i>Borysenko O., Logvinkov S., Shabanova G., Korohodska A., Ivashura M., Ivashura A.</i> Subsolidus structure of the MgO – FeO – Al ₂ O ₃ system | 59 |
| <i>Horbachova O.</i> Justification of the possibility of using thermomodified veneer in an environment with high moisture | 65 |
| <i>Melnyk Yu., Melnyk S., Mahorivska H.</i> Transesterification of vegetable oils' triglycerides with the head fraction of ethyl alcohol | 72 |
| <i>Mykhailova E., Deineka D., Pancheva H.</i> Analysis of plastic waste recycling methods | 80 |
| <i>Mits N., Beloshenko K., Bozhkov A.</i> Research on improvement of the method of periodic aeration of wastewater | 90 |
| <i>Sakhnenko M., Indykov S., Karakurkchi H.</i> Application of plasma-electrolyte coatings on titanium with refractory metals for detoxification of environments from polluting substances | 96 |
| <i>ELECTROPHYSICAL TECHNOLOGIES, EMC AND LIGHTNING PROTECTION</i> | |
| <i>Bogatirov I., Ponuzhdayeva H., Koliushko D., Rudenko S., Istomin A.</i> Dielectrics oil's test mashine wish voltage rice electronic modul | 103 |

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

**ВІСНИК НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ "ХПІ".
СЕРІЯ: НОВІ РІШЕННЯ В СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ**

Збірник наукових праць

№ 1(7)' 2021

Відповідальний редактор: Є. І. Сокол, чл.-кор. НАН України, д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПІ», Україна
Технічний редактор: С. І. Меньшикова, канд. фіз.-мат. наук, НТУ «ХПІ», Україна
Відповідальний секретар: Р. С. Томашевський, д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПІ», Україна
С. І. Меньшикова, канд. фіз.-мат. наук, НТУ «ХПІ», Україна

Відповідальний за випуск: д-р техн. наук, доц. Р. С. Томашевський

АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ ТА ВИДАВЦЯ: 61002, Харків, вул. Кирпичова, 2, НТУ «ХПІ».
Рада молодих вчених, тел. (057)707-69-37, e-mail: vestnik.nsmt@gmail.com

Підп. до друку «05» квітня 2021 р. Формат 60x84 1/8. Папір офсетний. Друк цифровий.
Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк. 12,0. Облік.вид.арк. 8,75.
Тираж 50 прим. Зам. № 67. Ціна договірна.

Видавничий центр НТУ «ХПІ». Свідоцтво про державну реєстрацію
суб'єкта видавничої справи ДК №5478 від 21.08.2017
61002, Харків, вул. Кирпичова, 2
