

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
ХІМІКО-ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ

КОМПОЗИЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ

**Збірник матеріалів
XV Міжнародної науково-
практичної онлайн-конференції**

23–24 квітня 2026 р.



Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2026

СКЛАД РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ

XV Міжнародної науково-практичної онлайн-конференції «Композиційні матеріали»

1. **Тобілко В.Ю.** голова редакційної колегії
к.т.н., доц., завідувач кафедри хімічної технології кераміки та скла
2. **Миронюк О.В.** д.т.н., доц., завідувач кафедри хімічної технології композиційних матеріалів
3. **Мельник Л.І.** д.т.н., доцент, доцент кафедри хімічної технології композиційних матеріалів
4. **Черняк Л.П.** д.т.н., проф., професор кафедри хімічної технології композиційних матеріалів
5. **Пашенко Є.О.** д.т.н., с.н.с., зав. відділом, інститут надтвердих матеріалів НАНУ ім. В.Н. Бакуля
6. **Бондарева А.І.** PhD, асист. кафедри хімічної технології кераміки та скла
7. **Білоусова А.О.** секретар редакційної колегії, асистент кафедри хімічної технології композиційних матеріалів
8. **Дорогань Н.О.** технічний секретар Секція 1
к.т.н., доц., ст. викладач кафедри хімічної технології композиційних матеріалів
9. **Баклан Д.В.** технічний секретар Секція 2
PhD, асистент кафедри хімічної технології композиційних матеріалів
10. **Пилипенко І.В.** технічний секретар Секція 3
к.х.н., ст. викладач кафедри хімічної технології кераміки та скла

Матеріали подаються в авторській редакції

Укладачі: Білоусова А.О, Баклан Д.В., Миронюк О.В.

K63 Композиційні матеріали: збірник матеріалів XV Міжнародної науково-практичної онлайн-конференції (23–24 квіт. 2026 р.) / уклад.: А.О. Білоусова, Д.В. Баклан, О.В. Миронюк – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2026. – 60 с.

ISBN 978-966-990-128-6

Збірник конференції містить тези доповідей, присвячені актуальним питанням технології композиційних матеріалів. У збірнику висвітлено сучасні підходи до розроблення, дослідження та впровадження нових технологічних рішень, обладнання й методів одержання композиційних матеріалів, а також розглянуто фундаментальні аспекти створення нових композицій на основі неорганічних і полімерних компонентів.

УДК 546, 666, 677

© Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря
Сікорського», 2026

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE
NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF
UKRAINE “IGOR SIKORSKY KYIV
POLYTECHNIC INSTITUTE”
FACULTY OF CHEMICAL TECHNOLOGY

COMPOSITE MATERIALS

Proceedings

**of the XV International Scientific and Practical Online
Conference**

23–24 April 2026



Kyiv
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute
2026

EDITORIAL BOARD
of the XV International Scientific and Practical Online Conference "Composite materials"

1. **V. Tobilko** **head of editorial board**
candidate of technical sciences (Ph.D.), associate professor, head of the department of chemical technology of ceramics and glass
2. O. Myronyuk
doctor of technical sciences, associate professor, head of the department of chemical technology of composite materials
3. L. Melnyk
doctor of technical sciences, associate professor, associate professor of the department of chemical technology of composite materials
4. L. Chernyak
doctor of technical sciences, prof., professor of the department of chemical technology of composite materials
5. Ye. Paschenko
doctor of technical sciences, SRO, chief of department, v. Bakul institute for superhard materials, NASU
6. A. Bondareva
Ph.D., Teaching assistant of the department of chemical technology of ceramics and glass
7. **A. Bilousova** **editorial board secretary**, assistant of the department of chemical technology of composite materials
8. **N. Dorogan** **Section 1 technical secretary**
candidate of technical sciences (Ph.D.), associate professor, associate professor of the department of chemical technology of composite materials
9. **D. Baklan** **Section 2 technical secretary**
Ph.D., assistant of the department of chemical technology of composite materials
10. **I. Pylypenko** **Section 3 technical secretary**
Candidate of Chemical Sciences (Ph.D.), associate professor, associate professor of the department of chemical technology of ceramics and glass

The materials are submitted in the author's original version

Compiled by: A. Bilousova, D. Baklan, O. Myronyuk

K63 **Composite materials:** Proceedings of the XV International Scientific and Practical Online Conference (April 23–24, 2026) / compiled by: A. Bilousova, D. Baklan, O. Myronyuk – Kyiv: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Publ. house "Polytechnica", 2026. – 60 p.
ISBN 978-966-990-128-6

The conference proceedings contain abstracts of papers devoted to current issues in composite materials technology. The proceedings highlight modern approaches to the development, research, and implementation of new technological solutions, equipment, and methods for producing composite materials, and also examine the fundamental aspects of creating new compositions based on inorganic and polymer components.

UDC 546, 666, 677

ISBN 978-966-990-128-6

© National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", 2025
© Faculty of Chemical Technology, 2025

ЗМІСТ

СЕКЦІЯ 1. КОМПОЗИЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ НА ОСНОВІ ПОЛІМЕРІВ

COMPUTATIONAL MODELING OF ELECTROCHEMICAL CORROSION BEHAVIOR IN BIFRACTIONAL SUPERHYDROPHOBIC COMPOSITE COATINGS YONG Z., BAKLAN D.V., MYRONYUK O.V., PUIKI L.	1
EFFECT OF COPPER- AND CALCIUM-BASED HYDROXYAPATITE ADDITIVES ON FEMTOSECOND LASER ABLATION OF CFRP BAKLAN D.V., VANAGAS E.	3
EFFECT OF RED MUD PARTICLE SIZE DISTRIBUTION ON ELONGATION AT BREAK OF COMPOSITES BASED ON ACRYLIC DISPERSION KROPYVIANSKA A., MELNYK L., SHNYRUK O., MILOTSKYI R.	5
EVOLUTION OF MICRODEFECTS IN POLYLACTIDE COATINGS UNDER ULTRAVIOLET EXPOSURE MYRONYUK O., KARAVAYEV T., SEVASTYANOVA O., DOMASHEVSKIY M.	7
REINFORCEMENT OF POLYMER PIPES WITH LONGITUDINAL FIBERS VYTVYTSKYI V.M., MIKULIONOK I.O., SOKOLSKYI O.L.	9
SYSTEMATIC ANALYSIS OF SLIPS PERFORMANCE AGAINST RAPID CONTAMINATION: CURRENT TRENDS, LIMITATIONS, AND RESEARCH GAPS RODIN A., MYRONYUK O.	11
ВИКОРИСТАННЯ ІЗОЦІАНАТОВИХ ПОЛІМЕРІВ В ЦИНКНАПОВНЕНИХ ПОКРИТТЯХ КОВАЛЕНКО С.Ю., КЛИМЕНКО А.В., КОВАЛЕНКО Ю.О.	13
ВИКОРИСТАННЯ ЦЕЛЮЛОЗНИХ ВОЛОКОН ЯК НАПОВНЮВАЧІВ У ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛАХ ТА БІООСНОВНИХ ПОКРИТТЯХ ВОРОБІЙОВА В.І., МИРОНЮК О.В., ГАЛИШ В.В., ТРУС І.М.	15
ВПЛИВ ГІДРОФІБІЗАЦІЇ НА ЕКОЛОГІЧНІ НАПОВНЮВАЧІ У ПОЛІЛАКТИДНІЙ МАТРИЦІ НАУМЧИК А.О.	17
ВПЛИВ СПОСОБУ РЕПЛІКАЦІЇ НА ТОЧНІСТЬ ВІДТВОРЕННЯ МІКРОТЕКСТУР І ЗМОЧУВАНІСТЬ ПОЛІМЕРНИХ ПОВЕРХОНЬ СТРАШЕНКО В.К., БЛОУСОВА А.О.	19
ВПЛИВ УМОВ СИНТЕЗУ НА ВЛАСТИВОСТІ ГІДРОЛІЗАТИВ ТЕТРАЕТОКСИСИЛАНІВ ТИХОНОВ П.С., СВИДЕРСЬКИЙ В.А.	21
ГУАНІДИНІЄВІ ПОЛІМЕРИ ТА ЇХ СТІЙКІСТЬ ДО БІОДЕСТРУКЦІЇ ВОРТМАН М.Я., КОПТЕВА Ж.П., КОПТЕВА Г.С., ЛЕМЕШКО В.М.	23
ЗАЛЕЖНІСТЬ ВОДОВІДШТОВХУВАЛЬНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПЛІВОК ЦЕЛЮЛОЗИ ВІД ГРАНУЛОМЕТРИЧНОГО СКЛАДУ ТА СТУПЕНЯ ГІДРОФІБІЗАЦІЇ СОЛДАТЕНКОВ В.Ю., МЕЛЬНИК Л.І.	25
ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ ПОЛІМЕРНИХ ВОЛОКНИСТИХ МАТЕРІАЛІВ У ТЕХНОЛОГІЯХ АДИТИВНОГО ВИРОБНИЦТВА ВИШТАЛОК І.В., СОВА Н.В., СЛЕПЦОВ О.О., САВЧЕНКО Б.М.	27
ПРОГНОЗУВАННЯ СУМІСНОСТІ СУБСТРАТ-ІНФУЗАТ МИРОНЮК О.В., МАКОВСЬКИЙ Д.П.	29

СЕКЦІЯ 2. КОМПОЗИЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ НА ОСНОВІ ТУГОПЛАВКИХ, НЕМЕТАЛЕВИХ І СИЛКАТНИХ МАТЕРІАЛІВ

ВЗАЄМОЗВ'ЯЗОК ПАРАМЕТРІВ ПОРИСТОСТІ ТА КІНЕТИКИ КОРОЗІЇ АРМУЮЧОГО КОМПОНЕНТУ ГЛУХОВСЬКИЙ В.В.	31
ВПЛИВ ХАРАКТЕРИСТИК ФУНКЦІОНАЛЬНИХ МІНЕРАЛЬНИХ НАПОВНЮВАЧІВ НА ПОРОВУ СТРУКТУРИ ТА МОРОЗОСТІЙКІСТЬ РОЗЧИНІВ НА ЦЕМЕНТНОМУ В'ЯЗУЧОМУ НЕСТЕРЕНКО М. Б.	33
МЕТОДОЛОГІЯ ДОСЛІДЖЕННЯ СУЛЬФАТОСТІЙКОСТІ БЕТОНІВ ГРІНЧЕНКО В.М., СІКОРСЬКИЙ О.О.	35
РЕСУРСОЗБЕРІГАЮЧА ТЕХНОЛОГІЯ ОТРИМАННЯ ГІДРАВЛІЧНОГО ВАПНА КРАСУЛІН М.О., ДОРОГАНЬ Н.О., ЧЕРНЯК Л.П.	37
ТЕМПЕРАТУРОСТІЙКІ РОЗЧИНИ ДЛЯ АНКЕРУВАННЯ КОВАЛЬЧУК А.В.	39
ТЕХНОГЕННА СИРОВИНА ДЛЯ ОТРИМАННЯ ЦЕМЕНТНОГО КЛІНКЕРУ	

Дорогань Н.О., Черняк Л.П., Шнирук О.М.	41
ХІМІКО-МІНЕРАЛОГІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА ВІДХОДІВ РУЙНУВАНЬ ЯК МІНЕРАЛЬНОГО КОМПОНЕНТА ЦЕМЕНТНИХ КОМПОЗИЦІЙ	
Белоград А.Ю., Мельник Л.І.	43
СЕКЦІЯ 3. КЕРАМІЧНІ ТА СКЛОПОДІБНІ МАТЕРІАЛИ	
ВПЛИВ РОЗМІРУ ЧАСТИНОК НЕОРГАНІЧНОЇ СКЛАДОВОЇ НА РЕОЛОГІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ГІДРОКСИАПАТИТ/ХІТОЗАН	
Синиця А.О., Іванченко С.Е., Сич О.Є.	45
ВПЛИВ ХІМІЧНИХ ДОБАВОК НА ПРОЦЕС СПІНЮВАННЯ ТА ФОРМУВАННЯ СТРУКТУРИ ПІНОСКЛА	
Плем'яніков О.М., Трунова В.В., Жданюк Н.В.	47
ГЕТЕРОФАЗНІ ДІЕЛЕКТРИЧНІ КЕРАМІЧНІ МАТЕРІАЛИ	
Борисенко О.М., Логвінков С.М., Шабанова Г.М., Горбунов К.О.	49
ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТИПУ СКЛА НА СТАБІЛЬНІСТЬ ШЛІКЕРІВ ДЛЯ ОТРИМАННЯ ВИСОКОПОРИСТОЇ СКЛОКЕРАМІКИ НА ОСНОВІ БІОГЕННОГО ГІДРОКСИАПАТИТУ ТА СКЛА ДЛЯ ІНЖЕНЕРІЇ КІСТКОВОЇ ТКАНИНИ	
Яценко А.П., Сич О.Є.	51
ЗАКОНОМІРНОСТІ ФАЗОУТВОРЕННЯ В СИСТЕМІ ZrO_2-TiO_2 ДЛЯ МІКРОХВИЛЬОВОЇ ДІЕЛЕКТРИЧНОЇ КЕРАМІКИ	
Логвінков С.М., Борисенко О.М., Клочко Н.П., Кривобок Р.В.	53
ОСОБЛИВОСТІ СПІКАННЯ ТА ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ БІОКЕРАМІКИ НА ОСНОВІ БІОГЕННОГО ГІДРОКСИАПАТИТУ ТА ОКСИДУ ЦИРКОНІЮ	
Чудінович О.В., Синиця А.О., Сич О.Є., Євич Я.І.	55
ПОКРАЩЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ КЕРАМІЧНОЇ ПЛИТКИ З ВИКОРИСТАННЯМ ВОДОРОЗЧИННИХ ПОЛІМЕРІВ КОМПАНІЇ <i>LAMBERTI</i>	
Пильник О.А., Бондарєва А.І., Тоблко В.Ю., Демидчук Л.В.	57
СФЕРИЧНО ГРАНУЛЬОВАНІ ПОРИСТІ КЕРАМІЧНІ МАТЕРІАЛИ НА ОСНОВІ ПРИРОДНИХ АЛЮМОСИЛКАТІВ	
Пилипенко І.В.	59

СЕКЦІЯ 1. Композиційні матеріали на основі полімерів

UDC: 620.197.6

DOI: 10.20535/iwccmm2026357856

COMPUTATIONAL MODELING OF ELECTROCHEMICAL CORROSION BEHAVIOR IN BIFRACTIONAL SUPERHYDROPHOBIC COMPOSITE COATINGS

Yong Z.¹, Baklan D.V.², Myronyuk O.V.³, Puiki L.⁴

¹PhD student, Department of Chemical Technology of Composite Materials, Chemical Technology Faculty, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine

²PhD, Assistant, Department of Chemical Technology of Composite Materials, Chemical Technology Faculty, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine

³D.Sc, Head of Department of Chemical Technology of Composite Materials, Chemical Technology Faculty, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine

⁴PhD, Professor, School of Energy and Power Engineering, Chongqing University, China

e-mail: 1. zuo.yong@lll.kpi.ua; 2. d.baklan@kpi.ua; 3. o.myronyuk@kpi.ua; 4. p.lung@cqu.edu.cn

Abstract. A fully coupled multi-physics finite element model was developed to investigate the electrochemical corrosion mechanisms of bifractional superhydrophobic composite coatings on aluminum substrates. The model integrates Butler-Volmer electrochemical kinetics, Nernst-Planck ion transport, and porous media theory to simulate corrosion initiation and propagation. Validation against experimental polarization data demonstrated that the model successfully reproduces corrosion current densities with high fidelity (within 10% deviation). Results reveal that optimal corrosion protection arises from a synergistic effect: a 3.2-fold increase in solution resistance due to tortuous ion diffusion pathways and a 5.8-fold increase in charge transfer resistance from silane passivation. The validated computational framework provides a mechanistic tool for the rational design of durable superhydrophobic coatings.

Keywords: superhydrophobic coatings, electrochemical corrosion, finite element modeling, Butler-Volmer kinetics, synergistic protection, composite materials.

The development of superhydrophobic composite coatings for marine corrosion protection represents a critical challenge in materials science and electrochemical engineering [1]. While experimental investigations have revealed significant performance variations among coating formulations, the underlying mechanisms governing protection and failure remain incompletely understood. The complexity of coupled electrochemical, transport, and structural phenomena necessitates advanced computational modeling approaches to bridge the gap between empirical observations and fundamental understanding [2], [3].

The purpose of the work is to develop a multi-physics computational model to validate experimental findings and mechanistically decompose the corrosion protection mechanisms of bifractional superhydrophobic composite coatings.

The object of study is a series of bifractional superhydrophobic composite coatings applied to aluminum substrates, specifically comparing an optimized formulation (Sample C4: 5 wt.% acrylic copolymer, 90 wt. % CaCO₃, 5 wt. % R972 silica) against unoptimized variants (Samples C3 and C5). The computational model was implemented in COMSOL Multiphysics 6.0, coupling Secondary Current Distribution, Transport of Diluted Species, and Deformed Geometry modules. Electrode kinetics followed the Butler-Volmer formulation with Tafel slopes ($\beta_a = +0.12$ V/decade, $\beta_c = -0.12$ V/decade) derived from experimental polarization curves. Simulations covered a 72-hour immersion period in 3.0 wt.% NaCl electrolyte.

The converged model successfully reproduced the experimentally measured polarization curves and corrosion current densities with high fidelity (within 10% deviation) for both bare aluminum and the optimized C4 coating. For Sample C4, the simulation predicted a corrosion potential of +142 mV vs. SCE, in excellent agreement with the experimental measurement of +137

mV. After 72 hours of simulated corrosion, the optimized coating demonstrated exceptional stability with enhanced barrier properties. In contrast, Sample C5 exhibited severe localized degradation, with the simulation predicting catastrophic corrosion at -645 mV vs. SCE, consistent with the experimental failure observed at -658 mV. The difference in corrosion current density between the optimal and failed samples spanned four orders of magnitude.

Table 1 – Experimental and predicted corrosion potentials of composite coatings

Sample	Composition (wt. %)	Experimental Ecorr (mV vs. SCE)	Predicted Ecorr (mV vs. SCE)
C4 (Optimized)	5% AC + 90% CaCO ₃ + 5% R972	+137	+142
C3 (Moderate)	9% AC + 78% CaCO ₃ + 13% R972	-6	-12
C5 (Failed)	23% AC + 42% CaCO ₃ + 35% R972	-658	-645

Beyond validation, the computational framework enabled a mechanistic decomposition of the protection mechanisms, providing quantitative insight inaccessible through experimental methods alone. The model revealed that the superior electrochemical performance of the C4 coating arises from two synergistic effects: a 3.2-fold increase in the solution resistance due to the tortuous ion diffusion pathways created by the dense particle network, and a 5.8-fold increase in the charge transfer resistance resulting from the chemical passivation of the surface by the silane treatment.

This work demonstrates the power of validated computational models to deconstruct complex phenomena and guide the optimization of advanced materials. The established framework can be utilized to predict the durability of superhydrophobic coatings under various environmental conditions, accelerating the design of next-generation protective systems.

CONCLUSIONS

This study successfully employed computational electrochemistry to validate and extend the mechanistic understanding of superhydrophobic composite coatings. The developed multi-physics finite element model accurately reproduced experimental polarization behavior within a 10% deviation margin. The computational analysis established that optimal corrosion resistance is not achieved through a single dominant mechanism, but rather through the synergistic interaction of increased solution resistance (3.2-fold) from the hierarchical particle network and elevated charge transfer resistance (5.8-fold) from surface passivation. The quantitative agreement between predicted and experimental corrosion potentials confirms the model's reliability as a predictive engineering tool.

REFERENCES

1. Xue, X., Liang, G., & Zhang, B. (2024). Superhydrophobic anti-corrosion coating: Advancing research from laboratory to real marine corrosion environment. *Progress in Organic Coatings*, 200, 109020. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2024.109020>
2. Jafarzadeh, S., Chen, Z., & Bobaru, F. (2019). Computational modeling of pitting corrosion. *Corrosion Reviews*, 37(5), 419–439. <https://doi.org/10.1515/correv-2019-0049>
3. Wang, L., Li, D., Yang, J., Shao, F., Zhong, X., Zhao, H., Yang, K., Tao, S., & Wang, Y. (2016). Modeling of thermal properties and failure of thermal barrier coatings with the use of finite element methods: A review. *Journal of the European Ceramic Society*, 36(6), 1313–1331. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2015.12.038>

UDC: 678.5

DOI: 10.20535/iwccmm2026357852

EFFECT OF COPPER- AND CALCIUM-BASED HYDROXYAPATITE ADDITIVES ON FEMTOSECOND LASER ABLATION OF CFRP

Baklan D.V.¹, Vanagas E.²

¹PhD, Assistant, Department of Chemical Technology of Composite Materials, Chemical Technology Faculty, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine

²PhD, Principal Investigator, Coherent Optics Laboratory, Department of Optoelectronics, Center for Physical Sciences and Technology, Vilnius, Lithuania
e-mail: 1. d.baklan@kpi.ua; 2. egidijus.vanagas@ftmc.lt

Abstract. This study investigates the effect of copper- and calcium-based hydroxyapatite additives in the epoxy matrix on the femtosecond laser ablation behavior of carbon fiber-reinforced polymers. Single-layer CFRP laminates containing 1 and 5 wt. % of hydroxyapatite modifiers were prepared and processed using a 1030 nm, 200 fs laser, while ablation efficiency and surface quality were evaluated by optical profilometry. The best performance was achieved for the Cu-based additive system, which showed maximum ablation efficiency at 10.9–11.4 J/cm² and a higher ablation depth of 31.8 μm compared with 23.8 μm for the unmodified composite. The results demonstrate that hydroxyapatite-modified CFRP is promising for precision laser cutting and milling of functional composite parts with low thermal damage and good dimensional quality.

Keywords: carbon fiber-reinforced polymer, femtosecond laser ablation, hydroxyapatite additives, epoxy matrix, ablation efficiency, precision machining, CFRP.

Carbon fiber-reinforced polymers (CFRP) are used in mechanical engineering and biomedicine due to their high specific strength, comparable to that of metals, combined with low weight. However, femtosecond laser processing of CFRP presents a number of challenges, primarily due to the varying efficiency and nature of processing in areas of the composite consisting of epoxy resin and carbon fibers with differing thermal properties. Various functional modifiers, such as those based on hydroxyapatites, which have found application in laser marking, can be incorporated into the epoxy matrix to improve processing quality. However, their effects remain insufficiently studied. This problem is particularly relevant for CFRPs intended for advanced structural and biomedical applications, where both material functionality and processing quality are critically important [1].

The aim of this study was to determine the effect of copper and calcium hydroxyapatite additives in an epoxy matrix on the efficiency of femtosecond laser ablation and the presence of various defects after treatment. The subject of the study was single-layer CFRP laminates based on DGEBA type epoxy resin, cycloaliphatic modified amine hardener, and carbon fabric with a density of 200 g/m². Copper- and calcium-based hydroxyapatites were synthesized via a hydrothermal method and incorporated into an epoxy matrix at concentrations of 1% and 5% by weight. Hand-layup was used for impregnation. Curing was carried out at room temperature for 7 days to achieve full curing. As a result, composites with a fiber volume fraction of approximately 60% were produced by this method. Laser ablation experiments were conducted using a femtosecond laser with a wavelength of 1030 nm and a pulse duration of 190 fs [2]. For analysis, ablation was performed on areas measuring 500 × 500 μm. Surface analysis was performed using optical profilometry.

The results of laser ablation showed (Fig. 1) that for the CFRP + Cu additive composite, maximum ablation efficiency was achieved at a fluence of 10.9–11.4 J/cm² for both formulations. For compositions with additives, an increase in the deviation of values is observed (Table 1). For CFRP filled with 5% blends based on Cu-75+Ca-25 and Cu-50+Ca-50, the best results were observed at fluence levels of 14 J/cm² and 12 J/cm², respectively. It is noteworthy that the use of the Cu-50+Ca-50 additive achieves a similar distribution of results to that of the original CFRP composite. The best performance indicators ($\Delta V/\Delta E_{\text{opt}}$) were achieved for the additive-containing formulation based on

pure copper hydroxyapatite, while maintaining a relatively high ablation depth ($31.8 \mu\text{m}$) compared to the original composite ($23.8 \mu\text{m}$).

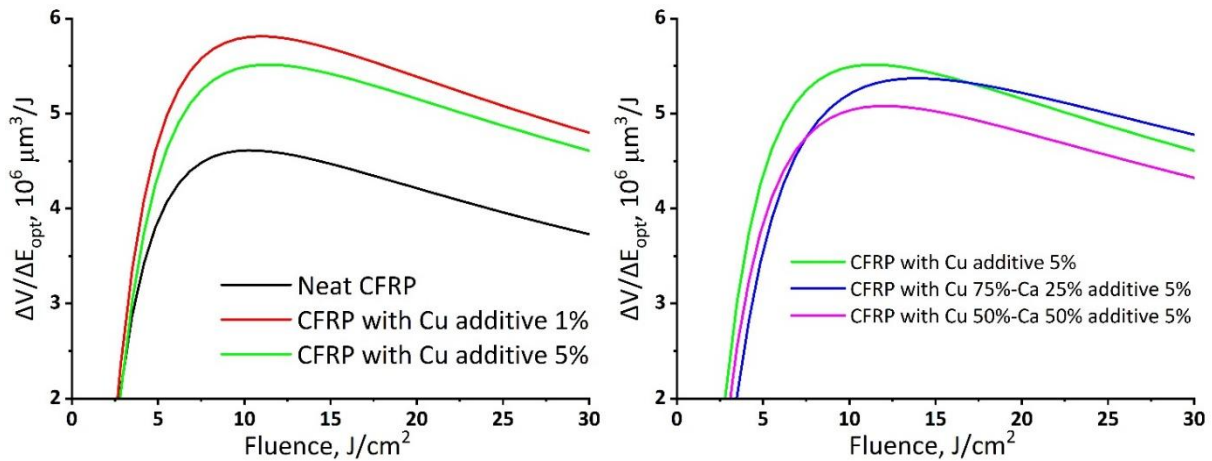


Figure 1 – Femtosecond laser ablation efficiency of CFRP samples

Table 1 – Fitted data summary

Sample	Parameter					
	Adjusted R ²	Reduced χ^2	RSS	δ	ϕ_{optimal}	$\Delta V/\Delta E_{\text{opt}}$
Neat CFRP	0.46	0.5	16.1	23.8	10.3	4.6
CFRP with Cu additive 1%	0.52	0.73	23.4	31.8	10.9	5.8
CFRP with Cu additive 5%	0.67	0.58	18.6	31.3	11.4	5.5
CFRP with Cu 75%-Ca 25% additive 5%	0.71	0.66	21.3	37.5	14.0	5.4
CFRP with Cu 50%-Ca 50% additive 5%	0.65	0.5	15.9	30.6	12.0	5.1

The observed trends indicate that the addition of hydroxyapatite improves the matrix response compared to unfilled systems, suggesting a more favorable redistribution and absorption of laser energy in the modified polymer phase. The increased scatter in the CFRP ablation data can also be explained by the spatial heterogeneity of fiber packing across the laminate thickness and the insufficiently uniform distribution of the additive. Thus, the study demonstrates that hydroxyapatite-modified CFRP can be processed within an effective fluence range of approximately 10–11 J/cm², while maintaining a low level of thermal damage and acceptable edge quality.

The results obtained are promising for the precision cutting and milling of functional CFRP parts, including components for lightweight engineering structures and potentially implant-related applications, where a small heat-affected zone, dimensional accuracy, and compatibility with functional fillers are required.

CONCLUSIONS

The addition of hydroxyapatite to an epoxy matrix affects the behavior of carbon fiber-reinforced plastic during femtosecond laser ablation and alters the effective operating window depending on the composition. The best results were obtained for the copper-based formulation, which provided the highest ablation efficiency ($5.8 \mu\text{m}^3/\mu\text{J}$) along with a greater ablation depth compared to the unmodified composite.

REFERENCES

1. Kartal, F. (2025). Abrasive water jet machining of Carbon Fiber-Reinforced PLA composites: Optimization of machinability and surface integrity for High-Precision applications. *Polymers*, 17(4), 445. <https://doi.org/10.3390/polym17040445>
- Baklan, D., Myronyuk, O., Bilousova, A., Šlevas, P., Minkevičius, J., Ulčinas, O., Orlov, S., & Vanagas, E. (2025). Femtosecond laser ablation of Copper-Hydroxyphosphate-Modified CFRP. *Materials*, 18(21), 4879. <https://doi.org/10.3390/ma18214879>

UDC: 678.71:678.6, 539.21

DOI: 10.20535/iwccmm2026357405

EFFECT OF RED MUD PARTICLE SIZE DISTRIBUTION ON ELONGATION AT BREAK OF COMPOSITES BASED ON ACRYLIC DISPERSION

Kropyvianska A.¹, Melnyk L.², Shnyruk O.³, Milotskyi R.⁴

¹ Student, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine

² Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Chemical Technology of Composite Materials, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine

³ Assistant of the Department of Chemical Technology of Composite Materials, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine

⁴ PhD, Institute of Science and Engineering, Kanazawa University, Kanazawa, Japan
e-mail: kropyvianska.anastasiia@iit.kpi.ua, luba_xtkm@ukr.net

Abstract. The aim of this work is to determine the effect of red mud particle size distribution on the elongation at break of composites based on Policril 590 acrylic dispersion. A series of compositions with the same filler content, namely 50 wt. % of the dry residue of the dispersion, was studied for different red mud fractions. In addition, a sample without fraction separation and a control sample of the unfilled dispersion were investigated for comparison. It was found that the pure dispersion is characterized by the maximum elongation at break of 728.6 %, whereas for the filled composites this value is 150.0–500.0 %. The obtained results can be used to select the optimal red mud particle size distribution for filled latex composites.

Keywords: red mud, particle size distribution, acrylic dispersion, Policril 590, elongation at break.

Red mud is a large tonnage technogenic waste of alumina production that can be considered not only an environmental problem but also a promising mineral filler for polymer composites. Previous studies have demonstrated the possibility of its use in composites and coatings based on various polymer binders, particularly at high filler content, which confirms the technological feasibility of this approach [1, 2]. At the same time, the performance properties of filled systems are determined not only by the concentration of red mud but also by its particle size distribution, since particle size affects the uniformity of filler distribution in the matrix, packing density, interfacial interaction area, and the nature of stress concentration in the material. For water-dispersed acrylic compositions based on Policril 590, this issue is particularly important because changes in filler dispersity can significantly affect deformation characteristics, in particular elongation at break. Therefore, the development of this topic is relevant from both scientific and practical points of view.

To determine the effect of red mud particle size distribution on the elongation at break of composites based on Policril 590 acrylic dispersion.

The object of the study was composites based on Policril 590 acrylic dispersion filled with red mud. For all filled systems, the red mud content was 50 wt. % of the dry residue of the dispersion. Compositions containing red mud fractions of 50, 63, 100, 200, 400, and >50 μm , as well as a composition with a mixture of fractions without sieving and the initial pure dispersion without filler, were studied. The experiments were carried out using a laboratory mechanical tensile testing machine. Based on the experimental data, elongation at break and tensile stress at break were calculated.

The calculated values of elongation at break and tensile stress at break for the studied samples are shown in Fig. 1. It was established that the control pure dispersion has the highest elongation at break, amounting to 728.6 %. For the filled composites, this value decreases to 150–500 % depending on the particle size distribution of red mud.

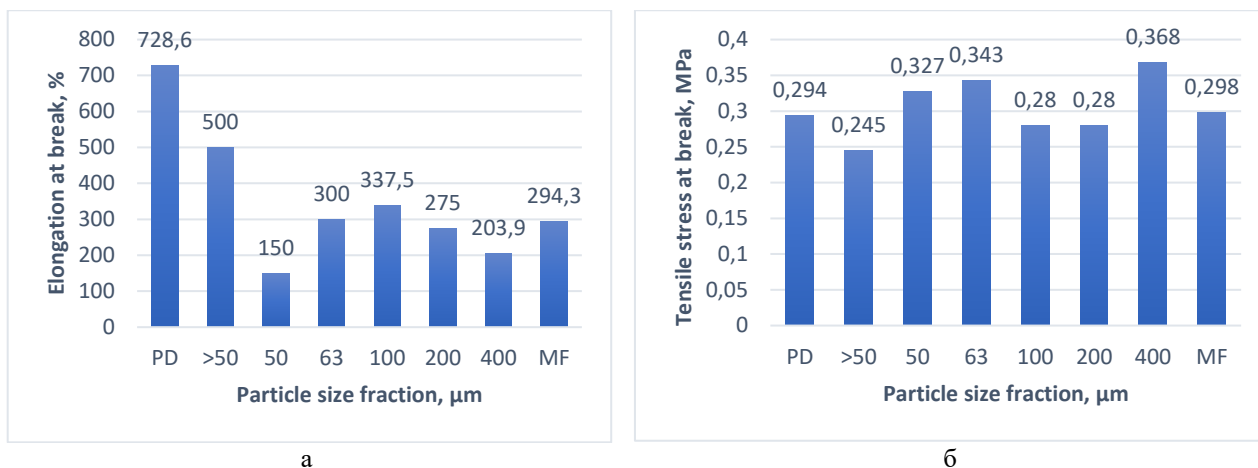


Figure 1 – Effect of red mud particle size distribution on elongation at break (a) and tensile stress at break (b) of composites based on Policril 590 acrylic dispersion, where PD is pure dispersion and MF is a mixture of fractions

The introduction of 50 wt. % red mud into Policril 590 acrylic dispersion leads to a decrease in elongation at break compared with the pure matrix, which is typical of filled polymer systems. However, the magnitude of this decrease strongly depends on the particle size distribution of the filler. The lowest elongation at break is characteristic of the composite containing the 50 μm fraction, whereas the highest value among the filled samples is observed for the >50 μm fraction. An intermediate value of 294.3 % was obtained for the mixture of fractions. The non-monotonic nature of the dependence indicates that deformability is influenced not only by particle size but also by particle packing, agglomeration, and interfacial interaction in the acrylic matrix–red mud system.

The obtained results can be used to select the optimal red mud particle size distribution in filled water-dispersed compositions based on acrylic latices. This opens up the possibility of purposeful control of the deformation properties of coatings and film-forming materials.

CONCLUSIONS

1. The effect of red mud particle size distribution on the elongation at break of composites based on Policril 590 acrylic dispersion at a constant filler content of 50 wt. % of the dry residue was studied.
2. It was established that the particle size distribution of red mud significantly affects the deformation properties of the studied composites.
3. It was shown that the pure acrylic dispersion is characterized by the maximum elongation at break of 728.6 %, whereas for the filled composites this value varies within 150.0–500.0 %.
4. It was established that among the filled samples the highest elongation at break is observed for the composite containing the >50 μm red mud fraction, while the lowest value is characteristic of the composite containing the 50 μm fraction.

REFERENCES

1. Melnyk, L., Svidersky, V., Chernyak, L., & Dorogan, N. (2018). Aspects of making of a composite material when using red mud. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(6(92)), 23–28. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.125702>
2. Melnyk, L., & Svidersky, V. (2024). Development of multifunctional polymer composites with high red mud content. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(12(132)), 34–43. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.317952>

UDC: 678.5

DOI: 10.20535/iwccmm2026357870

EVOLUTION OF MICRODEFECTS IN POLYLACTIDE COATINGS UNDER ULTRAVIOLET EXPOSURE

Myronyuk O.¹, Karavayev T.², Sevastyanova O.³, Domashevskiy M.⁴

¹*D.Sc., Head of chemical technology of composite materials Department, Igor Sikorsky KPI, Kyiv, Ukraine;*

²*Prof. Commodity Science and Customs Affairs Department, State University of Trade and Economics, Kyiv, Ukraine;*

³*Prof., Division of Wood Chemistry and Pulp Technology, Department of Fiber and Polymer Technology, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden;*

⁴*Ph.D. student, Commodity Science and Customs Affairs Department, State University of Trade and Economics, Kyiv, Ukraine*

e-mail: o.myronyuk@kpi.ua

Abstract. This work investigates the evolution of microdefects in polylactide (PLA) coatings under ultraviolet exposure. UV-induced photooxidation leads to increased surface polarity, enhanced wettability, and formation of a low-molecular-weight phase. Scanning electron microscopy reveals the development of microcracks associated with shrinkage and originating in regions of residual stress. The results highlight the relationship between processing-induced heterogeneities and defect formation in PLA coatings.

Keywords: polylactide, ultraviolet degradation, microcracks, residual stresses, photooxidation, surface morphology, polymer coatings

The transition from petroleum-based plastics to bio-based polymers represents an important step toward reducing environmental impact and improving sustainability. Among such materials, PLA has attracted considerable attention due to its biodegradability and availability from renewable resources [1]. However, the application of PLA in coating systems remains insufficiently explored. As a relatively new and non-traditional material for such uses, PLA requires detailed investigation of its behavior under service conditions. In particular, understanding the mechanisms of defect formation under ultraviolet exposure is of high relevance [2]. The present work aims to analyze the morphological evolution of PLA-based coatings subjected to UV irradiation.

The purpose of the work is to establish the influence of ultraviolet exposure on the formation and evolution of characteristic microdefects in polylactide coatings and to evaluate their role in microcrack initiation.

PLA films based on Ingeo Biopolymer 4060D (NatureWorks, USA) were used as the object of study. The films were prepared by solution casting from dichloromethane and filled with 25 wt. % kaolin. Ultraviolet aging was performed according to ASTM D4329 using a 400 W UV-A fluorescent lamp for 8 h at 60 ± 5 °C. Surface morphology and microstructural changes were analyzed by scanning electron microscopy (MIRA3 SEM, Tescan, Czech Republic).

After 8 h of UV exposure, a pronounced increase in surface tackiness of PLA films was observed. FTIR analysis confirmed that photooxidative degradation is accompanied by an increase in polar functional groups, primarily of carboxylic nature, with their relative content rising by approximately 1.7 times for neat PLA. This leads to enhanced surface polarity and wettability: the water contact angle for filled systems decreases from $\sim 74^\circ$ to $\sim 35^\circ$. Accordingly, the surface energy increases due to the growth of the polar component from about 7 to 35–36 mJ/m². The formation of a low-molecular-weight fraction results in strong adhesion to the substrate and is accompanied by the development of microcracks, as shown in Figure 1.

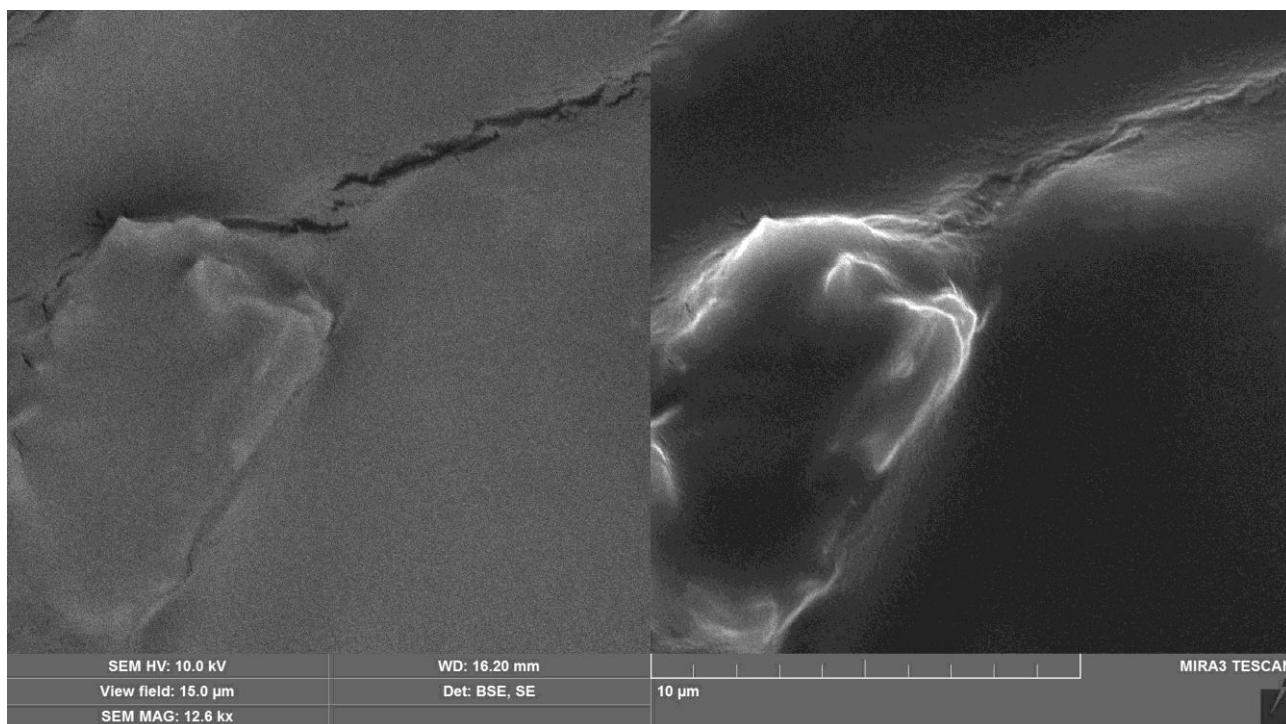


Figure 1 – Formation of surface cracks of UV aged PLA films

The formation of microcracks represents a distinct type of defect, differing from surface polarization effects. These defects are associated with shrinkage occurring during UV-induced degradation of PLA. Microcracks preferentially originate in regions where residual stresses are preserved after solution casting. As observed in Figure 1, crack initiation occurs at stress concentration points, such as particle edges, followed by their propagation across the surface. This indicates that the applied film formation method inherently contains structural inhomogeneities acting as defect precursors. Such behavior is consistent with previously reported studies on stress-driven degradation in polymer coatings [3].

The obtained results can be used to improve the design and processing of PLA-based coatings with enhanced resistance to UV-induced degradation, particularly in applications involving films, protective coatings, and sustainable packaging materials.

CONCLUSIONS

The purpose of the work has been achieved by establishing the effect of ultraviolet exposure on the evolution of microdefects in PLA coatings. It was shown that UV-induced photooxidation leads to increased surface polarity and the formation of a low-molecular-weight phase. A specific defect type - microcracks associated with shrinkage - was identified. Their initiation in stress concentration zones confirms the critical role of residual stresses formed during film processing.

REFERENCES

1. Panda, L., Parameswaranpillai, J., Gopi, J. A., Mishra, V., Ng, L. F., Dominic, C. M., Saritha, A., & Krishnasamy, S. (2026). Polylactic acid-based green polymers for food packaging application. A comprehensive Review. *Food Bioscience*, 77, 108335. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2026.108335>
2. Baklan, D., Vorobyova, V., Sevastyanova, O., Karavayev, T., & Myronyuk, O. (2026). Sustainable waterborne polylactide coatings enabled by hydrophobic deep eutectic solvents plasticization. *Polymers*, 18(2), 154. <https://doi.org/10.3390/polym18020154>
3. Foroutani, K., Khademi, S., Sharafkhani, S., Enayati-Gerdroodbar, A., Afsarimanesh, N., Zolfagharian, A., Salami-Kalajahi, M., & Pourabbas, B. (2025). Conducting Polymer-Based Coatings and Thin Films: A review on film processing and deposition techniques. *Polymer Reviews*, 65(4), 1057–1100. <https://doi.org/10.1080/15583724.2025.2511828>

UDC: 678.027.3:678.029.46-023.846

DOI: 10.20535/iwccmm2026356507

REINFORCEMENT OF POLYMER PIPES WITH LONGITUDINAL FIBERS**Vytvytskyi V.M.¹, Mikulionok I.O.², Sokolskyi O.L.³**¹*PhD, Teaching Assistant, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine*²*Doctor of Technical Sciences, Professor, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine*³*Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Chemical, Polymer and Silicate Engineering, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine
e-mail: 1. vytvytskyi.v@gmail.com; 2. i.mikulionok@kpi.ua; 3. sokolkiev@ukr.net*

Abstract. The aim of the study is to evaluate the influence of the spatial arrangement and volumetric content of continuous longitudinal fibers in the wall of polymer composite pipes on their strength characteristics compared to a 6061-T6 aluminum pipe. It is shown that the central arrangement of the reinforced layer with a fiber content of 70–80 % (vol.), primarily when using carbon fibers, provides an optimal safety factor and displacement, and the use of a reinforced polymer pipe allows increasing the safety margin up to 230 % compared to the base aluminum pipe. The obtained dependencies allow for a justified choice of the composite layer configuration when designing reinforced pipes for a given operating pressure.

Keywords: composite material, polymer, fibers, reinforcement, pipe.

The use of polymer pipes [1], and especially composite ones, is one of the main directions for replacing metal pipelines due to their low weight, corrosion resistance, and high performance characteristics [2–3]. Numerous studies show that their strength and durability significantly depend on the wall structure, type of reinforcement, volume fraction, and location of fibers, while rational partial reinforcement with controlled placement of the reinforced layer along the pipe thickness has been insufficiently studied [2].

The authors have patented a method for forming reinforced polymer pipes using an improved angular extrusion head, the design of which allows for reinforcing pipes with continuous longitudinal fibers and providing different volumetric content and options for their arrangement in the pipe cross-section (Pat. No. UA153089U).

The aim of the study is a quantitative assessment of the influence of the arrangement and volumetric content of continuous longitudinal reinforcing fibers in the wall of polymer pipes using numerical simulation in ANSYS Static Structural for pipes formed according to the method proposed by the authors. Separately, a comparison of the ultimate load-bearing capacity and stress-strain state of such composite pipes with a base aluminum pipe was performed.

Numerical analysis was carried out for pipes with a matrix made of polypropylene PP-R R200P, reinforced with glass and carbon fiber, with an outer diameter of 90 mm and a wall thickness of 5 mm, as well as with the arrangement of fibers in the inner and central layers and a volume content of 30, 50, 70, and 80 %, loaded with an internal pressure of 28.89 MPa (the burst pressure of an aluminum pipe) under the condition of its cantilever fastening with a hinged-movable support. The properties of the fibers without taking into account the matrix were taken as average values for the corresponding materials according to known experimental data [4–5], and the strength limit of the reinforced layer and the main characteristics of the composite were determined by the rule of mixtures for the longitudinal direction and the Halpin–Tsai model for the transverse direction.

Based on the numerical simulation results, the influence of the composite layer arrangement along the wall thickness and the volumetric fiber content on the stress-strain state and the ultimate load-bearing capacity of composite polymer pipes was analyzed. It was obtained that for the central layer of the composite reinforced with glass fiber – with an increase in the composite content from 30 to 80 %, the safety factor of the structure n increases from 1.51 to 2.30 and the displacements δ in

the transverse direction decrease from 8,11 to 6,29 mm; for the inner layer of the composite reinforced with glass fiber – a corresponding increase in n from 1 to 1.24 and a decrease in δ from 10.98 to 10.18 mm; for the central layer of the composite reinforced with glass fiber – an increase in n from 2.07 to 3.33 and a decrease in δ from 8.05 to 6.20 mm; for the inner layer of the composite reinforced with glass fiber – an increase in n from 1.04 to 1.74 and a decrease in δ from 21.90 to 14.42 mm; for the aluminum pipe – $n = 1$ and $\delta \approx 0.14$ mm.

The results obtained allow us to highlight the following patterns: 1) with the same volume content and fiber arrangement, composites with carbon fiber provide a greater safety margin compared to glass fiber; 2) for both types of fibers in all variants of fiber content, the central layer gives a higher safety factor and smaller displacements than the inner one; 3) the internal arrangement of the composite layer relative to the central one causes a significant increase in transverse displacements and a decrease in the safety margin, which reflects a decrease in stiffness under internal pressure; 4) increasing the concentration of reinforcing fibers in the wall thickness increases the safety factor (especially with a central arrangement) and stiffness, which is expressed in a decrease in displacements.

Comparison with the simulation results of a 6061-T6 aluminum pipe shows that reinforced pipes with central reinforcement outperform the aluminum analog by 1.5–3.3 times, which confirms the potential for increasing operational reliability when switching to composite structures. At the same time, composite pipes are characterized by increased deformability: minimum displacements of 6.2–6.3 mm are two orders of magnitude higher than the value for an aluminum pipe of 0.14 mm due to the lower elastic modulus of polymer composites in the transverse direction, which should be taken into account when designing systems with tight deformation tolerances.

The obtained dependencies allow for a justified choice of the composite layer configuration (type of fiber, its volumetric content, and arrangement along the wall thickness) when designing composite pipes for a given range of operating pressures.

CONCLUSIONS

The obtained simulation results of the ultimate load-bearing capacity and stress-strain state of reinforced polymer pipes under burst pressure loading show that the best ratio of safety factor and displacement is achieved for pipes with a central arrangement of the reinforcing layer and a high fiber content, especially in the case of carbon fiber reinforcement. The use of a reinforced polymer pipe allows increasing the strength by 230 % compared to the base aluminum pipe, but it is accompanied by an increase in elastic displacements, which determines the expediency of its use in conditions where the load-bearing capacity is a critical parameter, rather than stiffness.

REFERENCES

1. Vozniuk, V. T., & Mikulionok, I. O. (2012). *Intensyfikatsiia protsesu vyhotovlennia ekstrydovanykh polimernykh trub* [Intensification of the manufacturing process of extruded polymer pipes]. NTUU "KPI". <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/37521>
2. Ren, Y., Huang, W., Gong, J., Zeng, J., Zhong, G., Li, Z., Fu, Q., & Gao, X. (2025). HDPE/UHMWPE composite pipe: A systematic study from preparation process to performance enhancement. *Polymer*, 334, 128760. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2025.128760>
3. Benyahia, H., Tarfaoui, M., Moumen, A. E., Ouinas, D., & Hassoon, O. (2018). Mechanical properties of offshoring polymer composite pipes at various temperatures. *Composites Part B Engineering*, 152, 231–240. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.07.014>
4. Park, S., & Seo, M. (2011). Element and processing. In *Interface science and technology* (pp. 431–499). <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-375049-5.00006-2>
5. Ilankeeran, P. K., Mohite, P. M., & Kamle, S. (2012). Axial tensile testing of single fibres. *Modern Mechanical Engineering*, 02(04), 151–156. <https://doi.org/10.4236/mme.2012.24020>

UDC: 66.017

DOI: 10.20535/iwccmm2026357622

SYSTEMATIC ANALYSIS OF SLIPS PERFORMANCE AGAINST RAPID CONTAMINATION: CURRENT TRENDS, LIMITATIONS, AND RESEARCH GAPS

Rodin A.¹, Myronyuk O.²

¹Ph.D., Head of Solid State Laser Laboratory, Center for Physical Sciences and Technology, Vilnius, Lithuania

²D.Sc, Head of Department of Chemical Technology of Composite Materials, Chemical Technology Faculty, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine
e-mail: 1. aleksej.rodin@ftmc.lt; 2. o.myronyuk@kpi.ua

Abstract. This study presents a systematic analysis of SLIPS (slippery liquid-infused porous surfaces) as a versatile strategy for mitigating rapid contamination relevant to protective films and coatings. Contaminants are classified into key groups, and a literature screening based on keyword co-occurrence (ScienceDirect) is used to evaluate research trends. The results show a growing number of publications, with a strong focus on liquid repellency, corrosion resistance, and antifouling. However, particle contamination and mixed scenarios remain underexplored. The lack of systematic studies across liquids with controlled properties further highlights existing research gaps.

Keywords: SLIPS; liquid-infused surfaces; rapid contamination; liquid repellency; particle adhesion; antifouling; corrosion resistance

Chemical and biological contaminants relevant to protective surfaces can be grouped into several key categories: (i) inorganic corrosive agents (acids, alkalis, salts); (ii) organic contaminants (oils, solvents, hydrocarbons); (iii) particulate matter (dust, aerosols, soot); (iv) biological agents (bacteria, fungi, biofilms); and (v) complex mixed pollutants (industrial or environmental residues combining chemical and biological components). These groups differ in polarity, adhesion mechanisms, and persistence, which critically determines surface interaction and removal difficulty.

Slippery liquid-infused porous surfaces (SLIPS) are recognized as a nearly universal strategy for mitigating rapid contamination events [1] relevant to protective films and clothing, including exposure to inorganic corrosives, organic liquids, and particulate matter [2]. Their performance relies on a stable lubricating layer that minimizes direct contact and enables fast removal of contaminants. The aim of our study was to identify a gap of knowledge in the interaction of a broad range of contaminants with the SLIPS.

To support this objective, a targeted literature screening was conducted using major scientific aggregators such as ScienceDirect. The approach was based on keyword co-occurrence analysis, where the term “SLIPS” was systematically paired with specific contamination types. This allowed rapid estimation of research intensity and coverage across contamination categories. The quantitative results of this analysis, reflecting the relative representation of each contamination type, are summarized in Table 1.

Table 1 – Publications monitoring results

Year	Additional search term				
	Anti-fouling	Liquid-repellent	Corrosion	Icing	Dust
2025	122	128	200	110	61
2024	99	107	164	95	56
2023	73	102	140	90	45

Thus, the analysis of Table 1 indicates a steady year-by-year increase in the number of publications devoted to SLIPS technology. The most intensively studied areas include corrosion resistance, liquid repellency, and antifouling performance. In contrast, topics such as ice mitigation,

anti-icing behavior, and especially the reduction of particle adhesion have received comparatively less attention. To further contextualize these trends, it is essential to examine recent review studies that highlight the key technological challenges and emerging research directions in SLIPS.

The review [3] identifies several key growth directions for SLIPS technology, primarily related to durability and stability. The most critical limitation is lubricant depletion during operation, which leads to performance degradation and failure. Improving lubricant retention, self-healing efficiency, and controlled lubricant release is therefore essential.

The study [4] highlights several key development directions for SLIPS, primarily related to durability and design optimization. The main limitation remains lubricant loss under mechanical, thermal, or icing conditions, which directly reduces performance. Improving lubricant retention through optimized micro/nanostructures and enhancing self-healing capabilities are essential. Additionally, there is a need for more stable, environmentally friendly lubricants and simplified fabrication methods.

Most studies on liquid repellency focus on water and its solutions, while systematic investigations using liquids with controlled polarity or surface tension are rare. As a result, a unified understanding of repellency across different liquid types remains lacking. An additional challenge arises from cross-effects and mixed contamination scenarios, such as the simultaneous presence of liquids and particulates or the corrosion behavior of complex solution mixtures, which remain insufficiently understood.

CONCLUSIONS

The conducted analysis confirms that SLIPS represent a promising and versatile approach for mitigating rapid contamination in protective films and coatings. However, the current research landscape is strongly biased toward liquid repellency, corrosion resistance, and antifouling, while particle adhesion and mixed contamination scenarios remain significantly underexplored. In addition, the absence of systematic studies involving liquids with controlled physicochemical properties limits the fundamental understanding of interaction mechanisms. Key technological challenges, including lubricant depletion, durability, and stability under real conditions, further constrain practical implementation. Addressing these gaps is essential for advancing SLIPS toward reliable real-world applications

Funding. This research was funded by Research Council of Lithuania, grant number S-LU-26-1 and Ministry of Education and Science of Ukraine, contract number M/88-2026 dated 20.02.2026.

REFERENCES

1. Yao, W., Wu, L., Sun, L., Jiang, B., & Pan, F. (2022). Recent developments in slippery liquid-infused porous surface. *Progress in Organic Coatings*, 166, 106806. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2022.106806>
2. Dinc, S. K., Caglar, B. N., Demirel, G. B., & Keskin, N. O. S. (2025). Preparation of non-toxic green slippery liquid infused surfaces based on electrospun fiber with anti-algae and anti-bacterial properties. *Polymer Bulletin*, 82(9), 3463–3488. <https://doi.org/10.1007/s00289-025-05679-6>
3. Zhang, P., & Guo, Z. (2024). Robust anti-icing slippery liquid-infused porous surfaces inspired by nature: A review. *Materials Today Physics*, 46, 101478. <https://doi.org/10.1016/j.mtphys.2024.101478>
4. Li, J., Zhou, Z., Jiao, X., Guo, Z., & Fu, F. (2024). Bioinspired lubricant-infused porous surfaces: A review on principle, fabrication, and applications. *Surfaces and Interfaces*, 53, 105037. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2024.105037>

УДК: 667.64:678.026

DOI: 10.20535/iwccmm2026358037

ВИКОРИСТАННЯ ІЗОЦІАНАТОВИХ ПОЛІМЕРІВ В ЦИНКНАПОВНЕНИХ ПОКРИТТЯХ

Коваленко С.Ю.¹, Клименко А.В.², Коваленко Ю.О.³

¹Молодший науковий співробітник, Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона, Національної академії наук України, Київ, Україна

²К.т.н., старший дослідник, с.н.с., Київський науково-дослідний інститут судових експертиз Міністерства юстиції України, Київ, Україна

³Доктор філософії, асистент, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", Київ, Україна
e-mail: 1. kovalenko@paton.kiev.ua; 2. Aklimenko@meta.ua; 3. kovalenko.yurii@iit.kpi.ua

Анотація. Проведено порівняльну характеристику сучасних композиційних цинкнаповнених полімерних матеріалів, які використовуються для захисту від корозії металоконструкцій об'єктів гідроенергетичного комплексу, щодо їх ефективності за різних умов експлуатації (атмосферні, постійного занурення та змінного змочування). За результатами порівняльного аналізу комплексних досліджень фізико-механічних та електрохімічних властивостей систем визначено, що наявність в складі покриття серед іншого ізоціанатових полімерів значно покращує захисні властивості для всіх умов експлуатації.

Ключові слова: поліізоціанат, цинк, покриття, захист від корозії, електродний потенціал.

Використання сучасних пігментованих полімерних композиційних захисних матеріалів у вигляді одно- та багатокомпонентних систем, що містять домішки, пов'язані полімерним в'язучим (на уретановій, епоксидній, акрілово-поліуретановій, поліуретаново-перхлорвініловій основі, кам'яно-вугільні ПЕКи тощо) зі спеціальними хімічними реактивами, задля покращення захисту від корозії металоконструкцій увійшло в постійну практику. Серед найбільш перспективних та розповсюджених пігментів-домішок виділяють базальтові, алюмінієві та цинкові, поміж яких саме цинк через його відмінні протекторні властивості має досить широкий спектр використання для захисту металоконструкцій, а саме: від оцинкованих труб для побутових потре та збірних металоконструкцій навісних вентиляційних фасадів до сучасних лакофарбових цинкнаповнених систем (покриттів, надалі Zn-ПК) та промислових протекторів, зосібна й на гідроенергетичних об'єктах [1-4].

Зміну фізико-механічних властивостей Zn-ПК фіксували, виконуючи візуальну оцінку зовнішнього вигляду за видами руйнувань, що характеризують зміну декоративних (зміна блиску / кольору / набуття матового вигляду, брудотримання, мілення), захисних (розтріскування, вивітрювання, відшарування / зморщування / утворення пухирців та пор, корозія металооснови) та електрохімічних властивостей (протекторні захисні властивості визначали електрохімічним методом за показником «електродний потенціал цинку в покритті відносно хлор-срібного електроду порівняння»), а також за показниками адгезії покриття та міцності покриття під час удару [4, 5]. Додатково досліджували вплив збільшення товщини сухого шару покриття від 40 мкм до 120 мкм на його властивості.

В загальному випадку, до складу системи Zn-ПК входить дрібнодисперсний електролітичний цинк чистотою більше 99%, вміст якого в сухій плівці складає від 90% до 96%, скріплений полімерним в'язучим на епоксидній або уретановій основі зі спеціальними хімічними реактивами, що збільшують корозійну стійкість покриття (у воді, атмосфері). Щодо металооснови, вони виступають в якості аноду, а характер руйнування поверхневого захисного шару за будь-яких експлуатаційних умов носить виключно когезійний (внутрішаровий, без повного відшарування від поверхні з її оголенням), забезпечуючи збереження захисних протикорозійних властивостей навіть за умов глибокого руйнування:

електродний потенціал цинку в покритті коливається в межах від мінімального значення мінус 0,995 В (епоксидна / поліуретанова основа) до максимального мінус 1,111 В (зв'язуючий агент поліізоціанат), що свідчить про ефективний протекторний захист металооснови від корозійного руйнування.

Проте саме тип зв'язуючих компонентів, навіть за умов меншої концентрації цинку в покритті (90% проти 96%), та умови експлуатації є ключовими визначальними факторами для ефективного використання та подовження терміну їх експлуатації, особливо, коли питання стосується водних середовищ, а також стаціонарності чи турбулентності його руху. Поліуретанова та епоксидна основи для зв'язування цинку в покритті програють як за фізико-механічними захисними властивостями, так й за рівномірністю розподілу цинку в шарі нанесеного покриття на поверхню металооснови, в той час, як для Zn-ПК на основі поліізоціанату характерними є рівномірність розподілу цинку по всій товщині, навіть за умов багат шарового нанесення, при цьому товщина шару не впливає на якість захисних властивостей та не призводить до їх погіршення під час експлуатації в будь-яких з вищенаведених умов експлуатації металокопункцій.

Так, відсутність у складі системи покриття поліізоціанату в якості зв'язуючого агенту обумовлює його мілення під час експлуатації навіть в атмосферних умовах, перетворюючи верхній шар на дрібнодисперсний порошок з надзвичайно низькою адгезійною здатністю (зменшення адгезії від 2...3 МПа до 0,5 МПа проти сталого значення 5,5 МПа для покриття на основі поліізоціанату), що призводить до зменшення товщини активного захисного шару з часом, особливо в умовах змінного змочування, повного занурення та потоку рідини. Крім того, характерною негативною ознакою цих покриттів в період експлуатації навіть в атмосферних умовах є зменшення міцності під час удару (від 4,9 Дж до 0,98 Дж проти сталого мінімального значення 4,9 Дж для покриття на основі поліізоціанату) з пластинчастим скопковим відшаруванням поверхневого окисненого міленного цинкового шару.

ВИСНОВКИ

Отже, попри забезпечення стабільності протекторного захисту щодо металооснови, для цинкнаповнених систем відсутність ефективної зв'язуючої основи є ключовим фактором визначення ефективності захисту від корозії, незалежно від умов експлуатації металокопункцій, оскільки саме зв'язуючий агент забезпечує цілісність, а також незмінність і сталість його фізико-механічних та електрохімічних властивостей, навіть за умов меншої концентрації електролітичного цинку в сухій плівці.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Matviienkiv, O., Prysyzhnyuk, P., & Myndiuk, V. (2016). Development of the zinc coating pipe connection technology with arc soldering method using. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 81(3/5), 51–54. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.70346>
2. Jain, R., & Pitchumani, R. (2018). Fabrication and characterization of zinc-based superhydrophobic coatings. *Surface and Coatings Technology*, 337, 223–231. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.01.014>
3. Kovalenko, A., Klymenko, V., & Kuzmenko, V. (2020). Corrosion of galvanized pipes in hot water systems. *Physico-Chemical Mechanics of Materials: Electrochemical Protection and Corrosion Control*, Special Issue 13, 281–286. https://www.ipm.lviv.ua/corrosion2020/Chapter_05/I_281_Klymenko.pdf
4. Klymenko, A., Kovalenko, S., & Kovalenko, Yu. (2024). Features of the operation of cold and hot water supply systems regarding the corrosion activity of zinc-plated pipes in water supply. *Journal of Water and Water Purification Technologies. Scientific and Technical News*, 38(1), 47–60. <https://doi.org/10.20535/2218-930012024298467>

УДК: 676.1/3:66.081.63

DOI: 10.20535/iwccmm2026356238

ВИКОРИСТАННЯ ЦЕЛЮЛОЗНИХ ВОЛОКОН ЯК НАПОВНЮВАЧІВ У ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛАХ ТА БІООСНОВНИХ ПОКРИТТЯХ

Воробйова В.І.¹, Миронюк О.В.², Галиш В.В.³, Трус І.М.⁴

¹Доктор технічних наук., завідувачка кафедри фізичної хімії, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

²Доктор технічних наук., завідувач кафедри хімічної технології композиційних матеріалів, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

³Доктор технічних наук., в.о. завідувачки кафедри екології та технології рослинних полімерів, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

⁴Доктор технічних наук., доцент кафедри екології та технології рослинних полімерів, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

e-mail: 1. vorobyovavika1988@gmail.com; 2. o.myronyuk@kpi.ua; 3. v.galysh@gmail.com; 4. inna.trus.m@gmail.com

Анотація. Метою роботи є отримання та оцінка ефективності застосування целюлозних волокон з відновлювальних джерел та аграрних відходів як армуючих наповнювачів у полімерних композиційних матеріалах і біоосновних воднодисперсійних покриттях. Досліджено композиційні матеріали на основі полілактиду (PLA), армовані целюлозними волокнами, одержаними з аграрних відходів (шкаралупи кокосу та стебел кукурудзи). Підтверджено потенціал перетворення аграрних відходів у високоефективні функціональні наповнювачі для біоосновних покриттів на основі PLA, що забезпечує перспективи їх практичного застосування у створенні екологічно безпечних матеріалів нового покоління. Практична цінність роботи полягає у створенні екологічно безпечних полімерних композитів.

Ключові слова: полімерні композити, целюлозні волокна, аграрні відходи, армуючі наповнювачі, біоосновні покриття, іонні рідини, низькотемпературні розчинники.

Нині у виробництві полімерних композиційних матеріалів основними наповнювачами залишаються традиційні неорганічні матеріали, такі як скло, графіт, вуглець та інші. Вони забезпечують високу міцність, жорсткість та термостійкість кінцевих виробів, проте мають ряд суттєвих обмежень. Їх видобуток та обробка потребують значних енергетичних витрат і створюють значний екологічний слід. Крім того, утилізація композитів з такими наповнювачами є складною через обмежену переробку та можливе утворення небезпечних відходів. Саме тому природні матеріали розглядають як перспективну альтернативу традиційним неорганічним наповнювачам [1].

Водночас природні волокнисті наповнювачі, особливо целюлозні волокна набувають все більшої актуальності в умовах сталого розвитку та зелених технологій. Використання таких матеріалів у полімерних композиціях дозволяє підвищити безпеку виробництва, зменшити екологічне навантаження та полегшити утилізацію готових виробів, а також знизити витрати на закупівлю сировини, особливо коли йдеться про волокна з аграрних відходів, таких як солома та стебла кукурудзи [2].

У роботі було досліджено сумісність целюлозних волокон із полімерними матрицями на основі PLA. Об'єктом дослідження є композиційні матеріали на основі PLA, предметом – взаємодія целюлозних волокон з полімерною матрицею. Особливий інтерес представляють целюлозні волокна, що отримані з відновлювальних джерел та сільськогосподарських

відходів. Вони є доступними, недорогими та біорозкладними, що робить їх оптимальними кандидатами для розробки екологічно безпечних полімерних покриттів і композиційних матеріалів. Проте використання таких волокон у композиціях на основі PLA ускладнюється їх низькою сумісністю з полімерною матрицею.

Целюлозні волокна як армуючі наповнювачі можуть покращувати механічні властивості полімерних матриць. Волокна з аграрних відходів за правильної підготовки можуть замінювати синтетичні армуючі матеріали у різних галузях. Успішне армування забезпечується гарною сумісністю наповнювача з полімерною матрицею, що досягається завдяки модифікації поверхні волокон. Встановлено, що ефективність армування визначається рівномірністю розподілу волокон у матриці. При використанні целюлозних волокон з шкаралуп кокосу та стебел кукурудзи як наповнювачів у композиціях на основі PLA, забезпечується формування однорідної структури покриттів. Показано, що модифікація поверхні волокон сприяє підвищенню їх гідрофобності та зменшенню вологопоглинання на 10 % для кокосових волокон (сорбція зменшилася з 3,33 мас. % до ~3,0 мас. %) та на 30 % для кукурудзяних волокон (сорбція зменшилася з 3,61 мас. % до 2,81 мас. %) [3].

Наразі застосовують інноваційні методи модифікації наповнювачів. Для підвищення адгезійного контакту в системі «волокно – біополімер» застосовують модифікацію поверхні волокон різноманітними функціональними сполуками. Перспективним є використання низькотемпературних евтектичних розчинників нового покоління для передобробки целюлозної сировини. Іонні рідини з низькою температурою плавлення можуть застосовуватись для розчинення або модифікації целюлози, порушуючи водневі зв'язки у волокнах і покращуючи сумісність волокон з полімерними матрицями. Використання таких підходів сприяє покращенню адгезії між фазами та формуванню стабільної структури композитів.

ВИСНОВКИ

У роботі встановлено, що використання целюлозних волокон з аграрних відходів (шкаралупи кокосу та стебел кукурудзи) як наповнювачів у композиціях на основі PLA забезпечує формування однорідної структури покриттів та покращення їх експлуатаційних властивостей. Показано, що модифікація поверхні волокон сприяє підвищенню їх гідрофобності та зменшенню вологопоглинання (до 30 % для кукурудзяних волокон). Отримані результати підтверджують ефективність використання біосировинних наповнювачів для створення екологічно безпечних полімерних покриттів.

Funding. This research was funded by Ministry of Education and Science of Ukraine, agreement number PH/53 - 2024 (26.09.2024) (European Union aid instrument for fulfilling Ukraine's obligations in the Framework Program of the European Union for Scientific Research and Innovation "Horizon 2020").

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Myronyuk, O., Baklan, D., Bilousova, A., Smalii, I., Vorobyova, V., Halysh, V., & Trus, I. (2025). Plasticized Polylactide Film Coating Formation from Redispersible Particles. *AppliedChem*, 5(3), 14. <https://doi.org/10.3390/appliedchem5030014>
2. Галиш, В., Воробйова, В., Миронюк, О., & Трус, І. (2025). Дослідження способів обробки рослинних відходів для виділення целюлозних волокон – наповнювачів біосировинних покриттів. *Herald of Khmelnytskyi National University Technical Sciences*, 359(6.1), 490–494. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-359-69>
3. Myronyuk, O., Naumchyk, A., Baklan, D., Linyucheva, O., & Sikorsky, O. (2025). Development of corn stalk- and coconut shell-based fillers and their utilization in polylactide composites. *Scientific Notes of Taurida National V I Vernadsky University Series Technical Sciences*, 1(5), 186–193. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.5.1/26>

УДК: 66.06/.09

DOI: 10.20535/iwccmm2026356823

ВПЛИВ ГІДРОФОБІЗАЦІЇ НА ЕКОЛОГІЧНІ НАПОВНЮВАЧІ У ПОЛІЛАКТИДНІЙ МАТРИЦІ

Наумчик А.О.¹

¹Студент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна
e-mail: I. naumchik.artem@lil.kpi.ua

Анотація. У праці вивчено дію силанової гідрофобізації на властивості рослинних наповнювачів (стебла кукурудзи та шкаралупи кокоса) у водно-дисперсійній полілактидній матриці. За допомогою механічного подрібнення, хімічної обробки та модифікації здобуто волокнисті наповнювачі зі зниженою поверхневою енергією. Визначення гоніометрії засвідчили досягнення стану Кассі–Бакстера, що забезпечило високу водовідштовхувальну властивість покриттів.

Ключові слова: полілактид, гідрофобізація, кут змочування, сільськогосподарські відходи, целюлозні волокна.

Рух у напрямку біополімерів, на зразок полілактиду (PLA), являє собою важливий спосіб зниження екологічного забруднення, однак застосування PLA у водно-дисперсних покриттях стикається з перешкодами через слабку взаємодію між полярними целюлозними волокнами та менш полярною основою PLA. Незважаючи на те, що аграрні залишки слугують відновлюваним джерелом наповнювача, їхня природна гідрофільність спричиняє нерівномірне розподілення та підвищену вразливість до вологого середовища. Головним завданням залишається надання цим "неочищеним" аграрним відходам достатньої водовідштовхувальної здатності для надійної інтеграції у композиції на водній основі, не погіршуючи при цьому стійкість фінішного покриття.

Дана робота має на меті з'ясувати, як гідрофобізація на основі силану впливає на поверхневу енергію та вологопоглинання волокнистих матеріалів, виготовлених із кукурудзи та кокосової шкаралупи, коли вони інтегровані у полілактидну основу.

У цьому дослідженні застосовувалися дисперсії з PLA 4060 D [1], які пройшли стабілізацію поліакрилатом натрію та були армовані компонентами, видобутими з кукурудзяних стебел та горіхової шкаралупи кокоса. Ці армуючі матеріали готувалися шляхом механічного подрібнення з подальшою попередньою хімічною корекцією (за допомогою оцтової кислоти та перекису водню), після чого їх розділили на фракції розміром 30–400 мікрометрів. Процес гідрофобізації здійснювався із застосуванням 1% розчину поліметилгідроксилосану, розведеного у ксилолі. Для здійснення ключової оцінки використовувалися гоніометрія аби встановити кути змочування водою для модифікованих наповнювачів [2].

Основними результатами цього дослідження є визначенні значення кута змочування для оброблених гідрофобізатором біологічних наповнювачів у полілактидній матриці. У якості еталонної речовини для вимірювання було використано дистильовану воду. Як вимірювальне обладнання було використано прилад для вимірювання кута змочування BGD 190 від Bigued Precise Instruments (Китай). На рис. 1 було зазначено, що гідрофобізація значно збільшила кут змочування води до 133° для кукурудзяних та 140° для кокосових волокон.

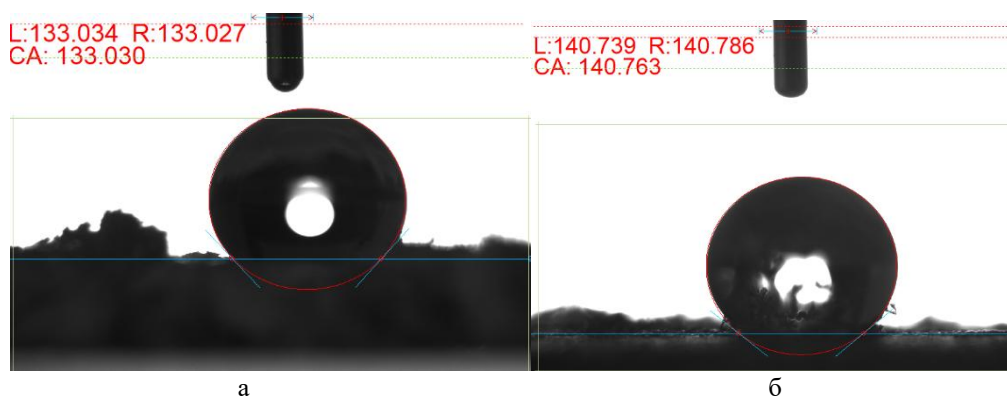


Рисунок 1 – Кут змочування води на поверхні гідрофобізованого пресованого шару матеріалу: а – волокна кукурудзи; б – волокна кокосового горіха

Значення кутів змочування водою зумовлені капілярною пористістю, що виникає внаслідок укладання волокон, яка створює стан Кассі-Бакстера. Такі великі значення куту змочування водою після обробки були досягнуті із-за природньої властивості цих наповнювачів до гідрофобності (95-100°), що узгоджується з водовідштовхувальними властивостями, наданими силановою обробкою.

Якщо узагальнювати, спостережувані високі кути змочування виникають через комбінацію природньої хімічної гідрофобності та розвиненої пористої капілярної архітектури у волокнах. Додатково, наявність полімолочної кислоти (PLA) зменшила здатність наповнювача до поглинання, що свідчить про міцну взаємодію на межі розділу фаз, яка стримує потрапляння вологи всередину композитного матеріалу.

Дане дослідження підтверджує реальність розробки цілковито біологічних покриттів, де вміст летких органічних сполук зведений до мінімуму, отриманих із залишків аграрного виробництва. Ці покриття можуть знайти застосування у сфері екологічно чистої упаковки й декоративних лакофарбових покриттів. Представлений підхід відкриває шлях до створення досліджень з розширенням для залучення широкого спектру аграрної сировини, зокрема стебел льону чи бананів, інтегруючи їх у різноманітні структури на основі біополімерів.

ВИСНОВКИ

У процесі вивчення було з'ясовано, що гідрофобізація сільськогосподарських відходів за допомогою 1% розчину поліметилгідроксилексану дає змогу перетворити їхні властивості з гідрофільних до гідрофобних. Як було досліджено, кут змочування водою з 95-100° був підвищений у 1,4 рази. Полілактидна матриця надає вплив капілярному поглинанню наповнювачів, що є висновком гарної міжфазної взаємодії. Дослідницький метод є універсальним та придатним до застосування на різноманітних видах біомаси, відкриваючи потенціал для розробки екологічно безпечної упаковки й покриттів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Myronyuk, O., Baklan, D., Bilousova, A., Smalii, I., Vorobyova, V., Halysh, V., & Trus, I. (2025). Plasticized Polylactide Film Coating Formation from Redispersible Particles. *AppliedChem*, 5(3), 14. <https://doi.org/10.3390/appliedchem5030014>
2. Myronyuk, O. V., Naumchyk, A. O., Baklan, D. V., Linyucheva, O. V., & Sikorsky, O. O. (2025). Development of corn stalk- and coconut shell-based fillers and their utilization in polylactide composites. *Scientific notes of Taurida National V.I. Vernadsky University. Series: Technical Sciences*, 1(5), 186–193. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.5.1/26>

УДК: 678.5

DOI: 10.20535/iwccmm2026358428

ВПЛИВ СПОСОБУ РЕПЛІКАЦІЇ НА ТОЧНІСТЬ ВІДТВОРЕННЯ МІКРОТЕКСТУР І ЗМОЧУВАНІСТЬ ПОЛІМЕРНИХ ПОВЕРХОНЬ

Страшенко В.К.¹, Білоусова А.О.²

¹Аспірант кафедри хімічної технології композиційних матеріалів, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

²Аспірант кафедри хімічної технології композиційних матеріалів, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна
e-mail: 1. trashenko.volodimir@lil.kpi.ua; 2. author@email.com

Анотація. Метою роботи є встановлення впливу способу реплікації та властивостей полімерів на точність відтворення мікротекстур і гідрофобність поверхонь. Формування мікротекстурованих полімерних поверхонь здійснювали методами лиття з розчину, реактивного формування та термопресування з використанням полікарбонату, полідиметилсилоксану та поліетилену. Встановлено, що розчинний метод із використанням полікарбонату забезпечує найвищу точність відтворення дрібних елементів, тоді як текстурування поліетилену та полідиметилсилоксану приводить до зростання кута змочування водою до 138–140°. Отримані результати є перспективними для розробки водовідштовхувальних покриттів і функціональних мікротекстурованих поверхонь.

Ключові слова: мікротекстури, полімерні поверхні, гідрофобність, кут змочування, реплікація текстур.

Формування поверхонь із заданою змочуваністю є актуальним напрямом у матеріалознавстві, що зумовлено їхнім застосуванням у багатьох процесах, таких як самоочищення, антикорозія та антиобledenіння. У роботі [1] показано, що створення мікрота нанорельєфу сприяє утворенню повітряних порожнин, що забезпечує мінімальну площу контакту краплі води, внаслідок чого зменшуються гістерезис кута контакту, кут нахилу та сила зчеплення.

До поширених методів отримання супергідрофобних полімерних плівок належать, головним чином, УФ-наноімпринтинг, фазове розділення, метод хімічного осадження тощо. Але незважаючи на значний прогрес, проблема масштабованості технологій створення мікротекстурованих поверхонь залишається актуальною [2]. Навіть при використанні одних і тих самих матриць точність перенесення може значно варіюватися залежно від типу полімеру та методу обробки, що обмежує відтворюваність функціональних властивостей поверхні.

Метою роботи є встановлення впливу способу реплікації та властивостей полімерів на точність відтворення мікротекстур і гідрофобність поверхонь.

Об'єктом дослідження є полімерні поверхні з мікротекстурами.

Формування структури здійснювали трьома методами: розчинним – нанесення 5 мас. % розчину полікарбонату в дихлорметані з подальшим випаровуванням (1 год, кімнатна температура) та сушінням (80 °С, 3 год); реактивним – лиття двокомпонентного полідиметилсилоксану з вакуумною дегазацією та затвердінням протягом 3 діб; термоформуванням – пресування поліетиленової плівки при ~115 °С.

Для термокомпресії використано поліетилен, для реактивного формування – полідиметилсилоксан, для проміжних реплік – полікарбонат. Первинні шаблони з нержавіючої сталі формували фемтосекундним лазером (розмір елементів до 10 мкм, глибина 20–30 мкм).

Негативні репліки використовували для отримання позитивних копій з поліетилену, PDMS та полікарбонату. Кут змочування визначали оптичним методом із гоніометричною системою; морфологію аналізували оптично. Оцінку змочування проводили у паралельному та перпендикулярному напрямках до текстури.

Усі методи реплікації забезпечують достатньо точне перенесення текстури: зберігаються періодичність, регулярність рисунка та ширина канавок. Водночас аналіз поперечних профілів показує відмінності у точності відтворення залежно від методу.

На негативі з полікарбонату вершини пірамідальних структур вкриті артефактами лазерного походження (до 5 мкм), розподіленими хаотично. У поліетиленових негативів структури є вужчими, що зумовлено використанням шаблону з меншими канавками.

Система з найнижчою в'язкістю (розчин полікарбонату в дихлорметані) забезпечила найвищу точність відтворення дрібних елементів текстури. Водночас утворення штучних дефектів на поверхні є небажаним, тому було застосовано інший підхід: спочатку методом лиття з розчину полікарбонату було виготовлено негативний шаблон, який надалі використовувався для формування позитивних структур із силіконового полімеру (реактивне формування) та поліетилену (термопресування).

Як показано в таблиці 1, текстурування поверхні в більшості випадків призводить до зростання кута змочування водою.

Таблиця 1 – Кут змочування (в перпендикулярному напрямку текстури) полімерів до та після формування структури

Полімер	Кут змочування без текстури, °	Кут змочування після текстурування, °
Поліетилен	93±3	138±3
Полісилаксан	103±3	140±3
Полікарбонат	87±3	128±3

Джерело: складено автором

Відповідно до отриманих значень можливо зробити висновок, що поліетилен і полісиліоксан досягають великих кутів змочування. Їх значення після текстурування сягає 140° та 139° відповідно. Натомість полікарбонат, через вищу полярність, є менш ефективним, однак підходить як проміжний негатив завдяки збереженню геометрії шаблону та високій відтворюваності позитивів. Отримані результати пов'язані з реологічними властивостями полімерів. Мікротекстури забезпечують зменшення площі контакту рідини з поверхнею, що підвищує гідрофобність.

Фінансування. Це дослідження було профінансовано в рамках проєкту №2025.06/0031 «Полімерні рідинно-інфузовані плівки зі здатністю до антиоблединіння» (договір №63.06/0031 від 02.03.2026) Національним фондом досліджень України.

ВИСНОВКИ

Встановлено, що використані методи (лиття з розчину, термоформування та реакційне формування) забезпечують ефективне відтворення мікрорельєфу. Текстурування поліетилену та полідиметилсілоксану суттєво підвищує гідрофобність даних полімерів, що підтверджується зростанням кута змочування до ~140°. Виявлено, що зі збільшенням в'язкості зменшується кількість артефактів, але погіршується точність відтворення дрібних деталей.

Отримані результати мають практичну значущість для розробки функціональних водовідштовхувальних і текстурованих поверхонь із підвищеною стабільністю в експлуатаційних умовах.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Bhushan, B., & Jung, Y. C. (2010). Natural and biomimetic artificial surfaces for superhydrophobicity, self-cleaning, low adhesion, and drag reduction. *Progress in Materials Science*, 56(1), 1–108. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2010.04.003>
2. Chen, Z., Wei, Y., Wu, C., Zhang, G., & Han, F. (2024). Study on the High-Efficiency Preparation of Superhydrophobic Polymer Thin Films by Continuous Micro/Nano Imprinting. *Polymers*, 16(7), 912. <https://doi.org/10.3390/polym16070912>

УДК: 66.03

DOI: 10.20535/iwccmm2026354104

ВПЛИВ УМОВ СИНТЕЗУ НА ВЛАСТИВОСТІ ГІДРОЛІЗАТІВ ТЕТРАЕТОКСИСИЛАНІВ

Тихонов П.С.¹, Свідерський В.А.²

¹Аспірант, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", Київ, Україна

²Д.т.н., професор, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", Київ, Україна
e-mail: 1. tykhonov.platon@lil.kpi.ua; 2. xtkm@kpi.ua

Анотація. Метою цієї оглядової роботи є систематизація і аналіз літературних даних, щодо впливу ключових параметрів синтезу на стабільність гідролізатів ТЕОС у золь-гель процесі. Висвітлено вплив рН, співвідношення $H_2O/TEOS$, розчинника та температури на кінетику, структуру золів та властивості кінцевих матеріалів. Робота є корисною для розробки поліфункціональних матеріалів на основі гідролізатів тетраетоксисиланів.

Ключові слова: тетраетоксисилан, гідролізати, золь-гель, поліфункціональні матеріали.

Золь-гель технологія є ефективним та масштабованим методом отримання неорганічних і гібридних матеріалів за відносно м'яких умов синтезу. Одним із найбільш поширених прекурсорів кремнеземних структур у золь-гель системах є тетраетоксисилан (ТЕОС), гідролізати якого широко застосовуються в матеріалознавстві та хімічній технології, як основи та наповнювачів функціональних покриттів, просочуючих, зв'язуючих систем і гелів, завдяки своїй сумісності з органічними та неорганічними компонентами, біосумісності, корозійній і термічній стійкості [1-3]. Особливості гідролізу та поліконденсації дозволяють прогнозувати властивості та сфери його застосування, а зміна умов синтезу й подальша модифікація матеріалу забезпечує контроль його поведінки та характеристик. Проте наявні дослідження прив'язані до конкретної галузі та не показують загальної картини впливу технологічних режимів на структуру і властивості продукту. Метою даної оглядової роботи є систематизація даних щодо впливу технологічних параметрів на синтез гідролізатів ТЕОС.

Об'єктом аналізу є золь-гель системи на основі гідролізатів тетраетоксисилану, описані у наукових публікаціях. Аналіз здійснювався на основі літературних джерел, у яких досліджувалися кінетика гідролізу та поліконденсації, стабільність золів, зміна в'язкості. Узагальнення проводилося шляхом порівняння результатів експериментальних досліджень, описаних у літературі.

Встановлено, що у кислому середовищі швидкість гідролізу значно перевищує швидкість конденсації, що призводить до утворення лінійних або слабо розгалужених полімерів. Це дозволяє отримувати стабільні, прозорі золі, ідеальні для тонких покриттів. У лужному середовищі домінує процес конденсації, що призводить до швидкого утворення компактних тривимірних колоїдних частинок, що може бути корисним для синтезу порошків. Окремо слід виділити критичну точку рН 2–3 (ізоелектрична точка кремнезему), де стабільність системи є мінімальною, а ризик швидкої коагуляції найвищим [1, 4, 5].

Аналіз джерел [4-6] показав, що при низьких значеннях молярного співвідношення вода/ТЕОС (r) відбувається частковий гідроліз, що обмежує ріст молекулярної маси, а конденсація сприяє утворенню етоксисилоксанів. Оптимальним для отримання стабільних золів вважається співвідношення $r = 2-3$, яке забезпечує достатню кількість гідроксильних груп для конденсації кремнієвих кислот. Надлишок води ($r > 4$) різко прискорює агрегацію та може спровокувати миттєве випадання осаду або утворення макропористих структур, що змінює функціональне призначення золю.

Значну роль у формуванні золь-гель систем відіграє розчинник (типово-етиловий або ізопропіловий спирт) який забезпечує гомогенність суміші води та тетраетоксисилану, які не

змішуються, знижуючи поверхневий натяг. Розчинник виступає середовищем, що дозволяє контролювати в'язкість системи та сповільнювати швидкість зіткнення реакційно здатних молекул. Високий ступінь розведення сприяє подовженню терміну придатності золю, запобігаючи передчасному гелеутворенню, що є критичним для промислового використання гідролізатів [2, 4, 5, 7]. В літературі вказано, що температурний режим істотно впливає на процеси гідролізу і поліконденсації. Підвищення температури прискорює реакції, посилює тепловиділення та може спричинити передчасну конденсацію, що призведе до швидкого зростання частинок, коагуляції й гелеутворення. Оскільки реакція гідролізу має екзотермічний характер, інколи застосовують попереднє охолодження реагентів (5–10 °С) для зменшення теплового ефекту та уповільнення конденсаційних процесів [7]. Найчастіше синтез проводять за температур, близьких до кімнатної, що дозволяє підтримувати баланс між швидкістю процесу та стабільністю золь-гель системи [1-3]. Для практичного застосування важливим є вибір прекурсору. Мономер ТЕОС забезпечує високу чистоту та передбачуваність у лабораторних умовах, що корисно для тонких покриттів та наноструктур, проте має високу леткість та суттєву усадку при висиханні. ЕТС-40 (етилсилікат-40), будучи сумішшю олігомерів, є більш зручним для промисловості. Він містить більше діоксиду кремнію в одиниці об'єму, має меншу усадку та забезпечує кращу адгезію у товстошарових покриттях, що робить його незамінним у виробництві антикорозійних фарб та керамічних форм [6-7]. У літературі також відзначено, що стабільність гідролізатів ТЕОС з часом знижується через поступове зростання частинок, підвищення в'язкості та формування тривимірної силосанової сітки внаслідок поліконденсації [4-5]. Раннє перемішування забезпечує однорідність системи та тимчасове зниження в'язкості, тоді як продовження або припинення перемішування після завершення гідролізу визначає домінацію поліконденсації або росту частинок полікремнієвих кислот [7].

ВИСНОВКИ

Узагальнення літературних даних показало, що найбільш стабільні золі формуються в умовах помірно кислого середовища, при контрольованому співвідношенні вода/ ТЕОС та достатньому розведенні спиртовим розчинником. Майбутні дослідження повинні зосередитися на розробці м'яких каталізаторів і проміжних шарів для роботи з металами, зменшенні усадки та тріщинності гелів, підвищенні стабільності в різних середовищах, оптимізації чутливих до параметрів процесів, подовженні терміну зберігання та контролю кінетики гелеутворення, а також на підвищенні відтворюваності експериментів шляхом ретельної статистичної обробки даних.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Hashjin, R. R., Ranjbar, Z., Yari, H., & Momen, G. (2022). Tuning up sol-gel process to achieve highly durable superhydrophobic coating. *Surfaces and Interfaces*, 33, 102282. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2022.102282>
2. Al-Saadi, S., & Raman, R. K. S. (2022b). Silane coatings for corrosion and microbiologically influenced corrosion resistance of mild steel: a review. *Materials*, 15(21), 7809. <https://doi.org/10.3390/ma15217809>
3. Tezgel, N., Özbek, Y. Y., Jilková, K., Míka, M. H., Kolářová, M., & Fojt, R. (2025). TEOS-Based fiber fabrication via electrospinning: influence of process parameters and NMC doping on functional properties. *Coatings*, 15(10), 1220. <https://doi.org/10.3390/coatings15101220>
4. Brinker, C. (1988b). Hydrolysis and condensation of silicates: Effects on structure. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 100(1–3), 31–50. [https://doi.org/10.1016/0022-3093\(88\)90005-1](https://doi.org/10.1016/0022-3093(88)90005-1)
5. Hench, L. L., & West, J. K. (1990b). The sol-gel process. *Chemical Reviews*, 90(1), 33–72. <https://doi.org/10.1021/cr00099a003>
6. Семченко, Г.Д.(1997). *Золь-гель процес у керамічній технології*. Харків: БІ.
7. Скородумова, О. Б., Тарахно, Є. В., Олійник, Д. Ю., Гончаренко, Я. М., & Шуба, І. В. (2017). *Керамічні, композиційні матеріали і вогнестійкі покриття на основі гібридних гелів*. Харків: НУЦЗУ.

УДК: 541.49:546.791.6 +546.73
 DOI: 10.20535/iwccmm2026356500

ГУАНІДИНІЄВІ ПОЛІМЕРИ ТА ЇХ СТІЙКІСТЬ ДО БІОДЕСТРУКЦІЇ

Вортман М.Я.¹, Коптєва Ж.П.², Коптєва Г.Є.³, Лемешко В.М.⁴

¹К.х.н., с.н.с., Інститут хімії високомолекулярних сполук НАН України, м. Київ, Україна

²К.х.н., с.н.с., Інститут мікробіології та вірусології ім. Д.К. Заболотного НАН України, м. Київ, Україна

³Пров. інж., Інститут мікробіології та вірусології ім. Д.К. Заболотного НАН України, м. Київ, Україна

⁴М.н.с., Інститут хімії високомолекулярних сполук НАН України, м. Київ, Україна
 e-mail: 1. ymar1962@i.ua

Анотація. Основною метою даної роботи був синтез гуанідинієвих полімерів та оцінка їх стійкості до біодеструкції під дією вуглеводнеокиснювальних бактерій (ВОБ). Досліджено гуанідинвмісні полімери та сітчастий композит на їх основі. Встановлено, що за присутності поліетергуанідинуретану, модифікованого гуанідиновим олігомером, кількість бактерій упродовж 90 діб була на 2–4 порядки меншою, ніж без модифікатора. Синтезовані полімери є перспективними для захисту різних конструкцій від біопшкоджень

Ключові слова: гуанідинієві полімери, вуглеводнеокиснювальні бактерії, мікробна стійкість, біодеструкція

Однією з причин зниження властивостей захисних матеріалів є метаболічна активність мікроорганізмів, які можуть ініціювати або стимулювати процеси руйнування. Антикоровий захист різних поверхонь здійснюється за рахунок ізоляційних покриттів різноманітного хімічного складу. Найбільш стійкими до дії мікроорганізмів є високомолекулярні сполуки [1]. Одним із способів підвищення мікробіологічної стійкості покриттів є модифікація біоцидними речовинами, які пригнічують ріст і розвиток агресивних мікроорганізмів. Тому пошук нових матеріалів, стійких до впливу мікроорганізмів, залишається своєчасним і актуальним.

Синтезувати гуанідинієві полімери та оцінити їх стійкість до біодеструкції під дією вуглеводнеокиснювальних бактерій.

Об'єктами даного дослідження стали: полігуанідинакрилати, поліетергуанідинуретан, сітчастий поліуретановий композит.

Схему синтезу гуанідинвмісного олігоетеракрилату та гуанідинвмісного олігоетеруретанакрилату наведено на Рис. 1. Ступінь біодеструкції оцінювали за зміною кількості вуглеводнеокиснювальних бактерій упродовж 90 діб експерименту та за втратою маси досліджуваних матеріалів.

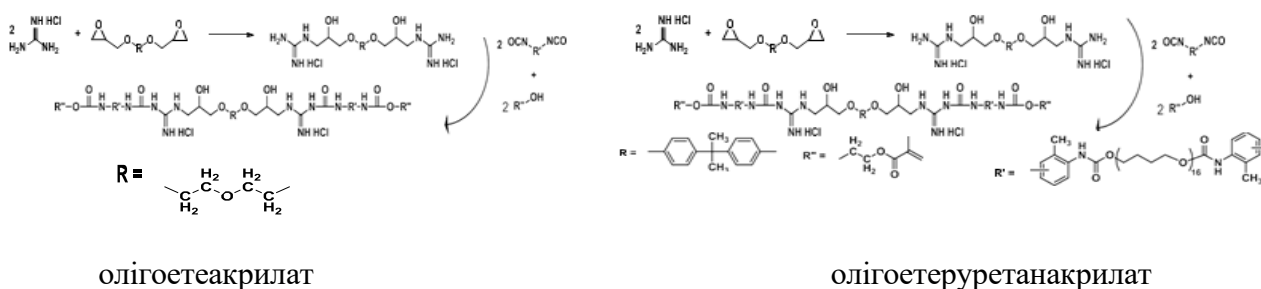


Рисунок 1 – Схеми синтезу гуанідинвмісних олігомерів

Сітчастий композит отримували під час отвердіння композиції, яка містить бі- та трифункціональний поліоксіпропілентріол (ММ 500), та поліоксіпропілендіол (ММ 1000), олігоепоксид Ерусоте 828, ізоціанатний аддукт толуїлендіізоціанату та триметилпропану із

29-30 % ізоціанатних груп, та розчинник 1:3:1,8:6:2, При отриманні матеріалу 1 можливі наступні реакції: реакція – уретаноутворення (1), тримеризації (2), утворення оксизолідону (3), утворення уретансечовини (4) та олігоетеру (5). Схема отримання сітчастого композиту представлена на Рис. 2.

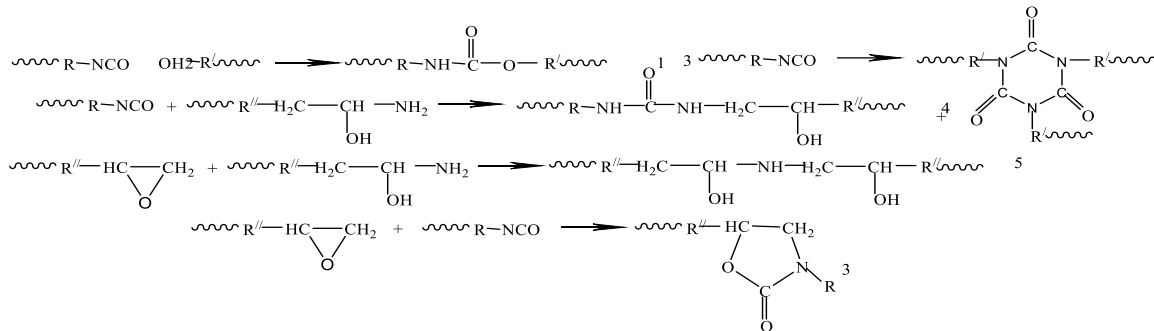


Рисунок 2 – Схема утворення сітчастого композиту

Оцінку стійкості синтезованих полімерних матеріалів до біодеструкції проводили за показником втрати маси після дії вуглеводнеоокиснювальних бактерій. Отримані результати наведено в Таблиці 1.

Таблиця 1 – Деструкція полімерних матеріалів за дії ВОБ

Штами бактерій	Деструкція, % втрати маси матеріалу			
	Поліетеракрилат	Поліетеруретанакрилат	Поліетергуанідинуретан	Поліетергуанідинуретан з антимікробною дією
<i>P. pseudoalcaligenes</i> 109	3,4±0,3	1,36±0,1	2,01±0,3	1,9±0,5
<i>R. erythropolis</i> 102	3,1±0,2	1,35±0,1	2,66±0,5	2,0±0,9
<i>B. subtilis</i> 138	3,6±0,5	1,22±0,09	2,77±0,6	1,7±0,5
Контроль	1,3±0,1	1,05±0,1	1,2±0,8	1,10±0,2

Мікробіологічні дослідження показали, що кількість ВОБ упродовж 90 діб експеримента була на 2-4 порядки меншою за присутності поліетергуанідинуретану модифікованого гуанідиновим олігомером з антимікробними властивостями, ніж без цього модифікатора. Було проведено оцінку ступеню деструкції досліджуваних матеріалів за впливу ВОБ (Табл. 1). За дії ВОБ найбільшої деструкції зазнав поліетергуанідинуретан (2,00 – 2,77 %). За присутності інгібітора корозії показник мікробної деструкції досліджуваних зразків був менший (1,7 – 2, %). Найбільшої деструкції зазнали випробувані матеріали за дією *R. erythropolis* 102 (2,0±0,9 %). Отже, інгібітор корозії у складі поліетергуанідину зменшував процент деструкції матеріалу.

Одержані результати свідчать про доцільність використання гуанідинієвих полімерів, зокрема поліетергуанідинуретану, модифікованого гуанідиновим олігомером з антимікробною дією, для створення захисних покриттів і композиційних матеріалів, призначених для роботи в умовах мікробіологічно активного середовища. Такі матеріали можуть бути використані для захисту конструкцій і поверхонь від біопшкоджень.

ВИСНОВКИ

Ступінь деструкції досліджених гуанідинієвих полімерів під дією ВОБ був незначним. Показано, що використання гуанідинового олігомера з антимікробною дією у складі поліетергуанідинуретану підвищує стійкість матеріалу до біодеструкції. Таким чином, синтезовані полімери є перспективними для створення захисних покриттів і композиційних матеріалів для різних конструкцій, що експлуатуються в умовах мікробіологічного впливу.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Gu, J.-G., & Gu, J.-D. (2005). Methods currently used in testing microbiological degradation and deterioration of a wide range of polymeric materials with various degree of degradability: A review. *Journal of Polymers and the Environment*, 13(1), 65–74. <https://doi.org/10.1007/s10924-004-1230-7>

УДК: 667.6

DOI: 10.20535/iwccmm2026356856

ЗАЛЕЖНІСТЬ ВОДОВІДШТОВХУВАЛЬНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПЛІВОК ЦЕЛЮЛОЗИ ВІД ГРАНУЛОМЕТРИЧНОГО СКЛАДУ ТА СТУПЕНЯ ГІДРОФОБІЗАЦІЇ

Солдатенков В.Ю.¹, Мельник Л.І.²

¹Аспірант кафедри хімічної технології композиційних матеріалів, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна

²Д.т.н., доцент, доцент кафедри хімічної технології композиційних матеріалів, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна

e-mail: soldatenkov.vasyil@lil.kpi.ua, luba_xtkm@ukr.net

Анотація. У роботі досліджено вплив природи целюлози, її гранулометричного складу та вмісту гідрофобізатора на водовідштовхувальні властивості целюлозних плівок. Плівки отримували з водних систем на основі нерозчинної та розчинної целюлози з подальшим визначенням кута змочування водою. Встановлено, що найвищий кут змочування, 139,7°, характерний для системи на основі TECHNOCEL 2500-1 при вмісті Rucosil В-НА 2 мас. %, що свідчить про перспективність використання цієї комбінації в екологічних гідрофобних покриттях.

Ключові слова. водовідштовхувальні покриття, гідрофобізація, целюлоза, екологічні покриття, полідиметилсилоксан.

Водовідштовхувальні покриття є перспективними для захисту поверхонь від зволоження, забруднення, обледеніння та корозії [1]. Водночас значна частина таких систем базується на фторвмісних компонентах або органорозчинних середовищах, що обмежує їх екологічність. Тому актуальним є пошук безфторових водних систем з використанням біонаповнювачів, зокрема целюлози, та екологічно прийнятних агентів зниження поверхневої енергії [2, 3].

Метою роботи є встановлення впливу природи целюлози, її гранулометричного складу та вмісту гідрофобізатора Rucosil В-НА на водовідштовхувальні властивості целюлозних плівок.

У роботі було досліджено нерозчинну технічну целюлозу TECHNOCEL 40 (ТС 40) і TECHNOCEL 2500-1 (ТС 2500-1), гранулометричний склад приведено в табл. 1. Для порівняння також використовували водорозчинні ефіри целюлози WALOCEL XM 6000 PV (WL 6000) і WALOCEL XM 30000 PV (WL 30000). Як гідрофобізуючий агент – водну емульсію функціональних полісилоксанів Rucosil В-НА з часткою активної речовини у кількості близько 50%.

Таблиця 1 – Гранулометричний склад нерозчинної целюлози

Марка	Гранулометричний склад, у %, мас.		
	> 32 μm	> 300 μm	> 2500 μm
ТС 40	< 6	-	-
ТС 2500-1	< 95	< 35	< 2

Джерело: дані виробника

Гідрофобізація целюлози проводилася шляхом додавання Rucosil В-НА в кількості 0,5%; 1%; 2% від загальної маси суспензії целюлози у воді. Вміст целюлози у суспензії складав 2 мас. % для всіх зразків загальний час змішування – 10 хв. Отриману суспензію наносили на підкладку та висушували впродовж 24 годин у сушильній шафі при 50 °С. Водовідштовхувальні властивості оцінювали за кутом змочування водою на основі аналізу зображень у програмі ImageJ з плагіном DROP ANALYSIS - LB-ADSA.

Встановлено, що водорозчинні ефіри целюлози формують суцільні плівки, які без гідрофобізатора демонструють кути змочування $49,1^\circ$ для WL 6000 і $89,1^\circ$ для WL 30000. Зі збільшенням вмісту Rucosil В-НА до 2 мас. % кут змочування зростає до $110,9^\circ$ для WL 6000 і до $104,3^\circ$ для WL 30000. Для ТС 40 без гідрофобізатора спостерігається повне змочування поверхні водою, що відповідає куту 0° . Найкращі результати отримано для ТС 2500-1: при вмісті Rucosil В-НА 0,5; 1,0 і 2,0 мас. % кут змочування становить $134,6^\circ$, $136,8^\circ$ і $139,7^\circ$ відповідно. Таким чином, максимальну гідрофобність виявлено для системи ТС 2500-1 + 2 мас. % Rucosil В-НА.

Отримані результати свідчать, що вирішальним фактором формування високої гідрофобності є не лише зниження поверхневої енергії за рахунок полісилоксану, а й наявність розвиненої поверхневої шорсткості. Для ТС 2500-1 це, ймовірно, пов'язано з поєднанням дрібних і грубих фракцій волокон, що забезпечує ієрархічну мікрорельєфну структуру поверхні та наближає її змочування до стану Кассі–Бакстера [4, 5]. Для розчинних ефірів целюлози, які формують більш однорідні плівки, кут змочування знаходиться на рівні $104\text{--}111^\circ$, що вказує на відсутність достатньо вираженої ієрархічної шорсткості.

Отримані результати підтверджують перспективність використання целюлози TECHNOCEL 2500-1 у поєднанні з Rucosil В-НА для створення екологічно безпечних водовідштовхувальних покриттів. Такі системи можуть бути використані як основа для розробки безфторових гідрофобних матеріалів для будівельних і функціональних покриттів.

ВИСНОВКИ

Встановлено, що водовідштовхувальні властивості целюлозних плівок визначаються природою целюлози, гранулометричним складом нерозчинних волокон та вмістом гідрофобізатора. Максимальний кут змочування $139,7^\circ$ досягнуто для системи на основі TECHNOCEL 2500-1 при вмісті Rucosil В-НА 2 мас. %. Для водорозчинних ефірів целюлози максимальні значення становили $110,9^\circ$ для WALOCEL ХМ 6000 PV і $104,3^\circ$ для WALOCEL ХМ 30000 PV. Отримані результати підтверджують, що поєднання гідрофобізації з ієрархічною шорсткістю поверхні є ефективним підходом до створення екологічних водовідштовхувальних покриттів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Bai, Y., Zhang, H., Shao, Y., Zhang, H., & Zhu, J. (2021). Recent progresses of superhydrophobic coatings in different application fields: An overview. *Coatings*, 11(2), 116. <https://doi.org/10.3390/coatings11020116>
2. Shigrekar, M., & Amdoskar, V. (2024). A review on recent progress and techniques used for fabricating superhydrophobic coatings derived from biobased materials. *RSC Advances*, 14(44), 32668–32699. <https://doi.org/10.1039/d4ra04767b>
3. Zhan, X., Chen, J., Yang, Z., Wu, G., & Kong, Z. (2023). Superhydrophobic film from silicone-modified nanocellulose and waterborne polyurethane through simple sanding process. *International Journal of Biological Macromolecules*, 232, 123431. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.123431>
4. Zhu, Y., Chen, L., Zhang, C., & Guan, Z. (2018). Preparation of hydrophobic antireflective SiO₂ coating with deposition of PDMS from water-based SiO₂-PEG sol. *Applied Surface Science*, 457, 522–528. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.06.177>
5. Cassie, A. B. D., & Baxter, S. (1944). Wettability of porous surfaces. *Transactions of the Faraday Society*, 40, 546. <https://doi.org/10.1039/tf9444000546>

УДК: 678.746

DOI: 10.20535/iwccmm2026356458

ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ ПОЛІМЕРНИХ ВОЛОКНИСТИХ МАТЕРІАЛІВ У ТЕХНОЛОГІЯХ АДИТИВНОГО ВИРОБНИЦТВА

Вишталюк І.В.¹, Сова Н.В.², Слєпцов О.О.³, Савченко Б.М.⁴

¹Студентка, Київський національний університет технологій та дизайну, Київ, Україна

²Д.т.н., доцент кафедри хімічних технологій та ресурсозбереження, Київський національний університет технологій та дизайну, Київ, Україна

³Д.т.н., професор кафедри хімічних технологій та ресурсозбереження, Київський національний університет технологій та дизайну, Київ, Україна

⁴К.т.н., старший викладач кафедри хімічних технологій та ресурсозбереження, Київський національний університет технологій та дизайну, Київ, Україна

e-mail: 1. ira.vishtalyuk12@gmail.com, 2. djanc@ukr.net, 3. 1079@ukr.net, 4. slyepcov.oo@knutd.edu.ua

Анотація. Робота має оглядовий характер і спрямована на систематизацію літературних даних щодо застосування полімерних волокнистих композитів у технологіях адитивного виробництва. На основі аналізу сучасних публікацій виявлено, що введення вуглецевих волокон у полімерну матрицю збільшує модуль пружності в 1,5–3 рази та підвищує міцність на розрив до 40–80%, але нерівномірний розподіл волокон при пошаровому формуванні є чинником анізотропії механічних властивостей. Ключовими технологічними параметрами є температура екструзії, швидкість друку та орієнтація шарів. Досліджено перспективність використання мультиматеріальних і функціонально-градієнтних систем для задоволення потреб авіаційної, автомобільної та оборонної промисловості.

Ключові слова: полімерні волокнисті композити, адитивне виробництво, орієнтація волокон, анізотропія властивостей.

Адитивне виробництво – це сучасний напрям розвитку технологій створення виробів різної геометрії та функціональності з використанням полімерних матеріалів. Незважаючи на це, традиційні полімери, що застосовуються у технологіях адитивного виробництва, характеризуються недостатнім рівнем жорсткості, міцності та теплостійкості, які використовуються при створенні відповідних виробів.

Перспективним напрямком вирішення цієї проблеми є використання полімерних композиційних матеріалів, армованих волокнистими наповнювачами. Згідно літературних даних [1,4], введення коротких або безперервних волокон дозволяє підвищити механічні характеристики виробів, розширюючи сфери застосування адитивного виробництва.

Застосування полімерних волокнистих композитів у адитивному виробництві стикається з проблемами нерівномірного розподілу волокон в об'ємі виробу, що приводить до вираженої анізотропії властивостей [1]. Також, залишається питання оптимізації параметрів друку та складу матеріалу для створення стабільних властивостей готових виробів.

Метою роботи є аналіз та систематизація літературних даних застосування полімерних волокнистих композиційних матеріалів у технологіях адитивного виробництва, а також виявлення закономірностей впливу типу армування та параметрів друку на механічні властивості готових виробів на основі перегляду літературних джерел. Об'єктом аналізу є літературні дані щодо полімерних композиційних матеріалів на основі полілактиду та АБС-пластику, армованих короткими та безперервними вуглецевими, скляними та натуральними волокнами, що використовуються у технологіях адитивного виробництва.

Аналіз джерел показав, що застосування волокнистого армування дозволяє підвищити експлуатаційні характеристики матеріалів. За даними [5], введення вуглецевих волокон у полімерну матрицю збільшує модуль пружності в 1,5–3 рази та підвищує міцність на розрив

до 40–80%. Значимим фактором при цьому є ступінь орієнтації волокон відносно напрямку прикладання навантаження.

У літературі вказано [4], що технологія пошарового нанесення розплаву дозволяє отримувати функціональні деталі з волокнистих композитів, але ще потрібно враховувати, що властивості матеріалу значною мірою залежать від параметрів 3D-друку. Температура екструзії, швидкість подачі матеріалу та орієнтація шарів є вирішальними факторами, які впливають на якість адгезії між шарами і на механічні характеристики виробу в цілому.

Аналіз джерел продемонстрував відмінність між двома типами армування: за даними [5], безперервні волокна забезпечують вище підсилення матеріалу порівняно з короткими, проте ускладнюють технологічний процес друку. Коротковолокнисті композити є більш технологічними та доступними, але мають нижчу ефективність армування. Отже, вибір типу волокна слід визначитися виходячи з конкретних вимог до виробу та доступного обладнання.

В літературі зазначено [2], що натуральні волокна є екологічно безпечними та економічно доступнішими альтернативами синтетичним армуючим матеріалам, але їх механічні характеристики є нижчими. Крім того, аналіз джерел [3] показав, що розвиток мультиматеріальних технологій відкриває більші можливості для створення конструкцій із функціонально-градієнтними властивостями.

Підсумовуючи аналіз літератури, можна сказати що ефективність полімерних волокнистих композитів у адитивному виробництві визначається поєднанням матеріалознавчих і технологічних факторів. У джерелах зазначається підвищення механічних властивостей пов'язане з передачею навантаження від матриці до волокон, однак цей процес ускладнюється пористістю та анізотропією, характерною для пошарового формування. Значимими факторами для практичного застосування є якість адгезії на межі розділу фаз “матриця–волокно”, ступінь орієнтації волокон та оптимізація параметрів друку.

ВИСНОВКИ

Проведений аналіз літератури показав, що тип армування (короткі чи безперервні волокна) є основним фактором для рівня механічних характеристик: безперервні волокна дають приріст міцності до 80 %, але вимагають спеціалізованого обладнання. Параметри друку: температура, швидкість та орієнтація шарів впливають на пористість і анізотропію готового виробу.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Gajbhiye, T. S., Waghmare, S., Dhande, M., Gondane, R., Giripunje, M., Shelare, S., & Belkhole, P. (2024). Polymer composite additive manufacturing: Applications, challenges and opportunities. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2024.06.013>
2. Adjei-Yeboah, J., & Jahan, M. P. (2026). Additive manufacturing of natural fiber reinforced polymer composites: A review. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*. <https://doi.org/10.1177/08927057261415828>
3. Ma, Q., Zhao, D., Palanisamy, S., Sahu, S. K., Song, Y., Radzuan, N. A. M., Kumar, A. P., Asyraf, M. R. M., & Rejab, M. R. M. (2026). Recent progress in additive manufacturing with multimaterial and multifunction: Process, structure, challenges, and opportunities. In *Additive Manufacturing of Smart Multifunctional Materials and Structures* (pp. 11–35). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-33500-6.00010-8>
4. Ibrahim, R. H., & Salman, H. (2026). Manufacturing of polymer-based composite material by FDM: Challenges and opportunities for functional parts design. *Next Materials*, 10, Article 101571. <https://doi.org/10.1016/j.nxmte.2025.101571>
5. Khodabandeh, M., Kordani, N., Eftekhari, M. H., & Ghasempour, M. (2026). Enhancing the mechanical properties of additive manufacturing printed samples through continuous fiber reinforcement: A review. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2026(1), Article 8864484. <https://doi.org/10.1155/amse/8864484>

УДК: 66.03

DOI: 10.20535/iwccmm2026357131

ПРОГНОЗУВАННЯ СУМІСНОСТІ СУБСТРАТ-ІНФУЗАТ

Миرونюк О.В.¹, Маковський Д.П.²¹Д.т.н., доцент, завідувач кафедри хімічної технології композиційних матеріалів, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна²Аспірант кафедри хімічної технології композиційних матеріалів, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна
email: 1. o.myronyuk@kpi.ua, 2. makovskiy.denis@ill.kpi.ua

Анотація. У роботі досліджено рідинно-інфузовані поверхні (РІП) на поліетиленовій підкладці та проаналізовано вплив мастильних рідин на їх ефективність. Використовуючи відомі теоретичні співвідношення та параметри розтікання, оцінено стабільність та здатність мастильного шару інкапсулювати воду. Показано, що ПДМС забезпечує найкращі умови для формування стабільних РІП завдяки оптимальному змочуванню субстрату та низькому тертю на межі «мастило–повітря». Вазелінове масло та сквалан виявляються менш ефективними, що підкреслює важливість текстурування поверхні для підвищення стійкості системи. Результати роботи дозволяють прогнозувати ефективність «субстрат–інфузат» та визначати критерії вибору мастильних рідин для створення функціональних поверхонь із високою ковзкістю та антиадгезійними властивостями.

Ключові слова: рідинно-інфузовані поверхні, супер-гідрофобність, змочування, параметр розтікання, міжфазний натяг.

Перші рідинно-інфузовані поверхні були створені в 2011 році [1], а в останні роки ця галузь була значно розвинена [2]. Сучасні рідинно-інфузовані поверхні формуються шляхом поєднання пористої структури із зниженою енергією поверхні, яка інфузується відповідними рідинами. Завдяки капілярному змочуванню мастило рівномірно розподіляється по поверхні, його шар є несумісним з іншими рідинами. Це забезпечує рідиновідштовхування, знижене тертя, самоочищення та інші цінні властивості.

Формування ефективних рідинно-інфузованих поверхонь забезпечується:

1. незмішуваністю мастильної та тестової рідини;
2. сумісністю мастила та субстрата;
3. сумісність мастила з субстратом повинна бути вище ніж з тестовою рідиною [3].

Об'єктом дослідження є рідинно-інфузовані поверхні – новий клас функціональних матеріалів із високою водо- та криговідштовхувальною здатністю, низькою адгезією. Основною проблемою, що розв'язується в роботі, є встановлення критеріїв ефективного вибору інфузуючої рідини для цільового субстрату.

Метою роботи є прогнозування ефективності пари субстрат – інфузат із використанням відомих теоретичних співвідношень та параметрів розтікання на прикладі поліетилен-полідиметилсилоксан (ПДМС).

Характер змочування визначається параметром розтікання: повне інкапсулювання краплі мастильною рідиною відбувається у випадку додатного значення параметра розтікання $S_{\text{MB(П)}} > 0$, тоді як при від'ємному значенні $S_{\text{MB(П)}} < 0$ крапля залишається на поверхні мастильного шару.

Параметр розтікання $S_{\text{MB(П)}}$, де індекси м, в та п відповідають мастилу, воді та повітря, відповідно, визначається через співвідношення міжфазних поверхневих натягів:

$$S_{\text{MB(П)}} \equiv \gamma_{\text{ВП}} - \gamma_{\text{МВ}} - \gamma_{\text{МП}} \quad (1)$$

де $\gamma_{\text{ВП}}$ поверхневий натяг на межі вода–повітря, $\gamma_{\text{МВ}}$ поверхневий натяг на межі масло–вода, а $\gamma_{\text{МП}}$ поверхневий натяг на межі масло–повітря.

Параметри розтікання мастильної рідини на твердому субстраті зазначені (2, 3):

$$S_{\text{MT(П)}} \equiv \gamma_{\text{ТП}} - \gamma_{\text{МТ}} - \gamma_{\text{МП}} \quad (2)$$

$$S_{\text{MT(B)}} \equiv \gamma_{\text{ТВ}} - \gamma_{\text{MT}} - \gamma_{\text{МВ}} \quad (3)$$

Залежно від конкретної чотирифазної системи мастильна рідина може повністю змочувати поверхню, частково її покривати або взагалі бути термодинамічно нестабільною. Умови проникнення мастила в текстуру пов'язані з шорсткістю підкладки (4):

$$\cos\theta = (\phi - r)/(r - 1) \quad (4)$$

де r це фактор шорсткості поверхні який визначається за рівнянням Вентцеля, ϕ – частка змоченої площі аналогічна до параметра змочування в моделі Кассі–Бакстера.

Твердий субстрат виявляє більшу спорідненість до мастильної рідини порівняно з водою за певних співвідношень параметрів розтікання:

$$\gamma_{\text{МВ}}(r - 1)/(r - \phi) < S_{\text{MT(B)}} < 0 \quad (5)$$

Таким чином, якщо мастильний шар відсутній під краплею, вона переходить у стан Вентцеля на поверхні. У разі часткової присутності мастила крапля здатна ковзати, однак взаємодія з твердою підкладкою зумовлює додаткові сили тертя. Якщо ж мастило не імпрегнує текстуру, крапля контактує з сухою поверхнею і також закріплюється [3].

Таблиця 1 – Результати розрахунків за формулами 1, 2 та 3

Інфузат	$S_{\text{МВ(П)}}$	$S_{\text{MT(П)}}$	$S_{\text{MT(B)}}$
ПДМС	12	1	-11
Вазелінове масло	-2	6	-10
Сквалан	-2	1	-5

Таким чином, ПДМС забезпечує найкращі умови для формування стабільних рідинно-інфузованих поверхонь на поліетиленовій підкладці. Вазелінове масло та сквалан демонструють нижчу ефективність у плані взаємодії з водою, хоча вазелін краще утримується на субстраті у повітряному середовищі. Для всіх трьох систем потенційним обмеженням є нестабільність мастильного шару у водному середовищі, що підкреслює важливість текстурування поверхні для підвищення стабільності рідинно-інфузованих поверхонь.

ВИСНОВКИ

Аналіз літературних даних та розрахунків параметрів розтікання показав, що ефективність рідинно-інфузованих поверхонь на поліетиленовій підкладці значною мірою визначається здатністю мастильного шару інкапсулювати воду, змочувати підкладку та забезпечувати низьке тертя на межі масло–повітря. Серед розглянутих рідин ПДМС забезпечує найкращі умови для формування стабільних рідинно-інфузованих поверхонь, тоді як вазелінове масло та сквалан демонструють нижчу ефективність у взаємодії з водою, що підкреслює важливість оптимального текстурування поверхні для підвищення стійкості таких систем.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Wong, T., Kang, S. H., Tang, S. K. Y., Smythe, E. J., Hatton, B. D., Grinthal, A., & Aizenberg, J. (2011). Bioinspired self-repairing slippery surfaces with pressure-stable omniphobicity. *Nature*, 477(7365), 443–447. <https://doi.org/10.1038/nature10447>
2. Chen, H., Zhang, L., Zhang, P., Zhang, D., Han, Z., & Jiang, L. (2016). A Novel Bioinspired Continuous Unidirectional Liquid Spreading Surface Structure from the Peristome Surface of *Nepenthes alata*. *Small*, 13(4). <https://doi.org/10.1002/sml.201601676>
3. Villegas, M., Zhang, Y., Jarad, N. A., Soleymani, L., & Didar, T. F. (2019). Liquid-Infused Surfaces: A review of theory, design, and applications. *ACS Nano*, 13(8), 8517–8536. <https://doi.org/10.1021/acsnano.9b04129>

**СЕКЦІЯ 2. Композиційні матеріали на основі
тугоплавких, неметалевих і силікатних матеріалів**

УДК 666.982.24
DOI: 10.20535/iwccmm2026356532

ВЗАЄМОЗВ'ЯЗОК ПАРАМЕТРІВ ПОРИСТОСТІ ТА КІНЕТИКИ КОРОЗІЇ АРМУЮЧОГО КОМПОНЕНТУ

Глуховський В.В

*К.т.н., доцент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»
e-mail: svscomp@ukr.net*

Анотація. У статті представлені результати дослідження залежності швидкості деструкції скляних армуючих волокон від дії агресивних новоутворень твердіючого неорганічного в'язучого. Метою дослідження є встановлення залежності інтенсивності процесів корозії мінерального армуючого компонента від параметрів пористості склоцементних композиційних матеріалів. За результатами роботи встановлена залежність швидкості зменшення міцності композицій на розтяг при згині композицій на основі портландського та лужного цементів від показника середнього розміру відкритих капілярних пор.

Ключові слова: композитні матеріали, кінетика корозії, параметри пористості.

Відомо, що зміни властивостей композитів на основі цементу армованого скловолокном у часі є результатом дії лужного середовища матриці та процесу ущільнення матриці у зоні її контакту зі скловолокном, що дозволяє стверджувати, що мікроструктура новоутворень в зоні контакту суттєво впливає на довговічність композиції [1].

Якщо представити швидкість реакції (V) як залежності: $V = C/(1/k + 1/b)$, де k - константа швидкості хімічної взаємодії, b - коефіцієнт масопереносу, C - концентрація реакційно здатних компонентів у зоні реакції, то стає очевидним, що за певних умов на швидкість реакції буде впливати і коефіцієнт масопереносу речовини. Якщо прийняти запропоновану гіпотезу про наявність дифузійного контролю над процесами хімічної корозії склоарматури за робочу, то можна припустити, що на певній стадії розвитку склоцементної композиції швидкість хімічної взаємодії між скловолокном та продуктами гідратації матриці залежатиме від параметрів, що характеризують мікроструктуру системи.

В якості об'єктів дослідження були використані композиції на основі портландцементу і лужного цементу та скляних волокон алюмоборосилікатного складу та ті самі волокна з захисним покриттям на основі поліметилфенілсилоксанової смоли. Параметри порової структури композицій визначалися у відповідності з [2] за кінетикою водопоглинання, яка описується рівнянням:

$$W_t = W_m [1 - e^{-(\lambda t)^\alpha}] \quad (1)$$

де: W_t - водопоглинання зразка за час t у відсотках за масою; W_m - повне водопоглинання зразка; e - основа натурального логарифму; t - час водопоглинання, годин; λ - показник середнього розміру відкритих капілярних пор; α - показник однорідності розмірів відкритих капілярних пор.

З метою визначення залежності інтенсивності процесів корозії мінерального армуючого компонента від показника середнього розміру відкритих капілярних пор (λ) було визначено швидкість зменшення міцності на розтяг при згині на різних етапах розвитку композицій за формулою:

$$V_i = \frac{R_1 - R_2}{t_2 - t_1} \quad (2)$$

де: V_i - швидкість зменшення міцності на розтяг при згині за певний період тверднення композиції, МПа/доба; R_1, R_2 - міцність на розтяг при згині, МПа, після тверднення композиції на протязі періоду t_1 та t_2 діб, відповідно, де $t_2 > t_1$.

Результати випробування композиційних матеріалів на основі портландцементу армованих незахищеними скляними волокнами та волокнами з захисним покриттям після їх тверднення у нормальних умовах представлені у таблиці 1.

Таблиця 1 – Межа міцності на розтяг при згині ($R_{зг}$) та показник середнього розміру відкритих капілярних пор (λ) композицій на основі портландцементу при твердненні у нормальних умовах

Показник	В/Ц	Значення показника для композиції на основі портландцементу та							
		незахищеного скловолкна після тверднення на протязі, діб				захищеного скловолкна після тверднення на протязі, діб			
		28	90	180	360	28	90	180	360
$R_{зг}$, МПа	0,25	30,4	22,4	17,6	14,1	29,5	26,0	25,0	23,4
	0,30	39,4	25,9	20,5	13,6	37,3	30,4	29,8	23,5
	0,35	39,9	27,2	22,7	16,8	35,2	29,0	26,0	23,5
	0,40	41,0	25,9	20,7	11,8	34,7	26,9	24,2	22,4
λ , відносних одиниць	0,25	6,4	5,3	3,5	2,5	2,0	1,0	0,6	0,3
	0,30	10,2	5,3	4,0	2,9	2,3	1,2	0,7	0,3
	0,35	9,5	4,7	4,0	2,9	2,4	1,5	0,9	0,6
	0,40	13,0	6,5	5,0	3,3	2,8	1,7	0,7	0,4

Залежність швидкість зменшення міцності на розтяг при згині композицій від показника середнього розміру відкритих капілярних пор, значення якого було визначено на початку періоду, представлено на рисунку 1. Аналогічні залежності були отримані для композицій на основі лужного цементу при твердненні у нормальних умовах на протязі 28, 90, 180 та 360 діб та на основі портландцементу при їх тепловологій обробці на протязі 3, 6, 15,5 та 31 години.

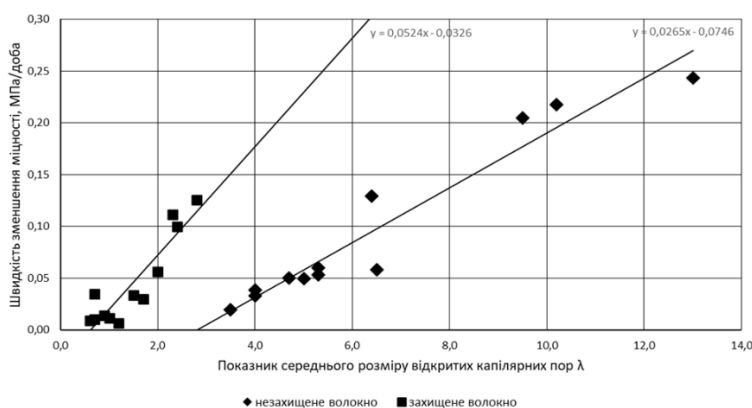


Рисунок 1 – Залежність швидкості зменшення міцності на розтяг при згині композицій від показника середнього розміру відкритих капілярних пор у композицій на основі портландцементу при твердненні у нормальних умовах

ВИСНОВКИ

Отримані залежності швидкості зменшення міцності досліджуваних композицій, виготовлених при різних В/Ц, з параметрами їх порової структури показує, що незалежно від виду в'язучого найбільш явна залежність існує між швидкістю зменшення міцності композицій на певному етапі твердіння і показником середнього розміру пір, визначеним на початку цього етапу. Наведені закономірності є наслідком залежності процесу корозії склоарматури від кількості агресивних новоутворень в'язучого, що надходять в зону контакту волокно-матриця, концентрація яких у цій зоні постійно зменшується внаслідок їх взаємодії із армуючими волокнами.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Meimei Song, Phil Purnell, Ian Richardson. Microstructure of interface between fiber and matrix in 10-year aged GRC modified by calcium sulfoaluminate cement. Cement and Concrete Research, Volume 76, 2015, P. 20-26, ISSN 0008-8846. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.05.011>
2. ДСТУ Б В.2.7-170:2008 Бетони. Методи визначення середньої густини, водопоглинання, пористості і водонепроникності. Київ, 2008. 38 с.

УДК: 666.971.1

DOI: 10.20535/iwccmm2026355395

ВПЛИВ ХАРАКТЕРИСТИК ФУНКЦІОНАЛЬНИХ МІНЕРАЛЬНИХ НАПОВНЮВАЧІВ НА ПОРОВУ СТРУКТУРИ ТА МОРОЗОСТІЙКІСТЬ РОЗЧИНІВ НА ЦЕМЕНТНОМУ В'ЯЖУЧОМУ

Нестеренко М. Б.

*Аспірант кафедри хімічної технології композиційних матеріалів, Національний технічний
університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна
e-mail: 1. nesterenkom@i11.kpi.ua*

Анотація. Робота має оглядовий характер та спрямована на аналіз та узагальнення інформації про актуальні дослідження впливу фізико-хімічних характеристик та гранулометричних параметрів мінеральних функціональних наповнювачів природного походження (пісок та вапняк) так і різноманітних наповнювачів техногенного походження на формування порової структури та морозостійкість та, як наслідок, довговічність і збереження заданих експлуатаційних характеристик матеріалів. Враховуючи кліматичні умови в яких знаходиться територія України, значна частина будівельних конструкцій експлуатується в умовах циклічних температурних коливань і підвищеної вологості, що робить актуальним покращення відповідних параметрів.

Ключові слова: мінеральні наповнювачі, композити, гранулометрія, морозостійкість, властивості, структура, склад.

Підвищення довговічності та експлуатаційної надійності сухих будівельних сумішей на цементному в'язучому у мурувальних, штукатурних, теплоізоляційних і ремонтних роботах при зовнішньому використанні або в неопалювальних приміщеннях є актуальним у сьогоденні.

Метою роботи є аналіз та узагальнення результатів актуальних досліджень закономірностей впливу характеристик функціональних наповнювачів природного та техногенного походження на порову структуру композитів та їх довговічність протягом циклів заморожування-відтавання. У дослідженнях використані стандартні методи вимірювання на міцність та стиск, дослідження мінерального (фазового) складу методом рентгенофазового аналізу, дослідження порової структури методами SEM.

Так у випадку використання еолового піску було досліджено композити з різними співвідношеннями пісок/в'язуче (портландцемент), а саме 0, 0,25, 0,5, 0,75, 1 та піддано їх відповідно 0, 20, 40, 60, 80 циклам заморожування-відтавання [1]. Авторами дослідження отримано результати які показують, що еоловий пісок у складі ефективно зменшує пошкодження внутрішньої порової структури спричинені циклами заморожування-відтавання. Присутній ефект мікрозаповнення еоловим піском не тільки зменшує пористість, але й сприяє більш рівномірному розподілу розмірів пор, зменшуючи частку великих пор і збільшуючи частку дрібних пор, покращуючи структуру пор з точки зору збереження міцності композиту за триваючих циклів заморожування-відтавання. Авторами встановлено, що оптимальним співвідношенням піску до в'язучого є 0,25 за якого морозостійкість досягає свого оптимального рівня. Зі збільшенням кількості еолового піску у складі цей показник зменшується.

В іншому дослідженні авторами обрано метод заміни у складі композиту портландцементу без мінеральних добавок портландцементом з мінеральною добавкою - шлаком доменним гранульованим [2]. Визначено, що морозостійкість зменшується зі збільшенням коефіцієнта заміщення портландцементом зі шлаком через недостатнє ущільнення структури пор розміром менше 150 нм та зсуву піку розподілу розмірів пор у бік більшого діаметра. Збільшення частки великих пор спричиняє підвищення проникності композиту (бетону, суміші).

Заміна традиційних функціональних наповнювачів (кварцових пісків) вапняковим борошном/порошком/піском та вплив цих наповнювачів на довгострокову міцність на стиск та довговічність досліджені в різних комбінаціях даних матеріалів в композиті [3]. Встановлено, що вапняковий наповнювач значно знижує міцність на стиск за високого співвідношення водоцементного відношення (в/ц) 0,47, тоді як його вплив на суміші з низьким в/ц 0,36 є помірним, подібним до впливу кварцового піску. На відміну від піску, вапняковий наповнювач знижує стійкість композиту до міграції хлоридів при в/ц 0,47, тоді як цей ефект стає незначним при зниженні цього співвідношення до 0,36. Частки вапнякового наповнювачу у матриці композиту забезпечують зменшення усадки розчину, особливо у сумішах з низьким в/ц. Вапняковий наповнювач збільшує як розмір пор, так і частку більших пор розміром понад 50 нм у сумішах із в/ц 0,47, але з помірним збільшенням за в/ц 0,36.

Композити можуть мати комбінований вплив циклів заморожування-відтавання та сульфатів. Авторами іншого дослідження використано розчини з комбінацією доменного шлаку, вапнякового борошна та золи виносу [4]. У рамках дослідження було проведено цикли заморожування-відтавання у чистій воді та у розчині Na_2SO_4 з масовою часткою 5%. Результати показали, що вапнякове борошно ущільнює структуру, але його активність є низькою. При вмісті до 20% хімічна реакція є вищою, ніж фізична. Пуцоланова активність золи та шлаку збільшує кількість продуктів вторинної гідратації, оптимізують структуру пор та покращують щільність. Комбінування вапняного порошку, золи та шлаку може покращити морозостійкість. Морозостійкість композиту за наявності сульфатного середовища погіршується на відміну від середовища з чистою водою. Є зміни морфології, втрата маси, зменшення міцності на стиск та розтяг.

ВИСНОВКИ

Аналіз джерел показав, що використання функціональних наповнювачів природного і техногенного походження (вапнякового борошна/порошку/піску, шлаку доменного гранульованого, золи виносу, поліфракційного піску) сприяє ущільненню мікроструктури та зменшенню об'єму капілярних пор, що впливає на підвищення морозостійкості та довговічності будівельних матеріалів. Підбір складів та комбінацій функціональних наповнювачів, водоцементного відношення дозволяє досягати максимізації необхідних властивостей в залежності від умов та середовища використання матеріалу.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ:

1. Zhang, J., Gao, Z., Zhang, H., Chen, S., Qin, X., & Zhang, H. (2025). Effect of aeolian sand on pore structure and frost resistance of foam concrete. *Journal of Building Engineering*, 114, 114445. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2025.114445>
2. Ding, Z., Quy, N. X., Noguchi, T., Kim, J., & Hama, Y. (2022). A study on the change in frost resistance and pore structure of concrete containing blast furnace slag under the carbonation conditions. *Construction and Building Materials*, 331, 127295. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127295>
3. Zhang, M., Lv, H., Zhou, S., Wu, Y., Zheng, X., & Yan, Q. (2023). Study on the Frost Resistance of Composite Limestone Powder Concrete against Coupling Effects of Sulfate Freeze-Thaw. *Buildings*, 13(11), 2776. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings13112776>
4. Jiang, Z., Yang, Q., Wang, B., Li, C., Zhang, J., & Ren, Q. (2024). Limestone filler as a mineral additive on the compressive strength and durability of self-compacting concrete with limestone manufactured sand. *Journal of Building Engineering*, 94, 109965. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.109965>

УДК: 691.32; 620.193
DOI: 10.20535/iwccmm2026357747

МЕТОДОЛОГІЯ ДОСЛІДЖЕННЯ СУЛЬФАТОСТІЙКОСТІ БЕТОНІВ

Грінченко В.М.¹, Сікорський О.О.²

¹Аспірант, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

²К.т.н., старший викладач, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна
e-mail: 1. hrinchenko.v.m.-khk51f@edu.kpi.ua; 2. o.sikorsky@kpi.ua

Анотація. Метою роботи є аналіз методологій оцінки стійкості бетонів до сульфатної та мікробіологічно індукованої корозії (МІС). На основі огляду міжнародних стандартів (ASTM, EN) та інноваційних підходів (pH-stat титрування) доведено обмеженість класичних методів статичного занурення у відтворенні реальної кінетики деградації матеріалів. Обґрунтовано перехід до динамічного моделювання середовища як основи для комплексних протоколів тестування, що забезпечують об'єктивне прогнозування довговічності цементних композитів.

Ключові слова: сульфатна корозія, біогенна сірчана кислота, цементні композити, методи випробувань, pH-stat титрування, довговічність.

Довговічність цементних композитів в агресивних середовищах є ключовою проблемою будівництва. Особливу небезпеку становить сульфатна корозія, що протікає як у формі хімічної взаємодії з утворенням вторинного еtringіту, так і у вигляді мікробіологічно індукованої корозії (МІС). Остання спричинена дією біогенної сірчаної кислоти, що продукується бактеріями в каналізаційних колекторах при критичному зниженні рівня pH [1, 2, 4]. Попри наявність численних досліджень, універсальна методологія оцінки сульфатостійкості все ще формується, оскільки традиційні методи часто не відтворюють складну кінетику та реальні умови експлуатації конструкцій [3, 10].

Базовими методами оцінки сульфатостійкості є статичні випробування на занурення згідно зі стандартами ASTM C1012/C1012M [5] та EN 13529 [6]. Хоча ці підходи є фундаментальними для сертифікації, вони мають суттєві обмеження при моделюванні реальних кислотно-сульфатних атак. Зокрема, висока лужність цементної матриці призводить до швидкої нейтралізації розчину, а утворення на поверхні зразків щільного шару гіпсу створює «бар'єрний ефект». Це блокує подальше проникнення агресивних іонів, штучно уповільнюючи деградацію матеріалу та призводячи до хибних прогнозів довговічності [7, 10].

Для об'єктивної оцінки корозії сучасна методологія переходить до динамічних систем контролю. Інноваційним є застосування автоматизованого pH-stat титрування, що підтримує постійний рівень кислотності протягом усього експерименту. Це дозволяє точно визначити здатність матеріалу до нейтралізації кислоти (ANC) та встановити пряму кореляцію між об'ємом реагенту і втратою маси матеріалу [7]. Такий підхід забезпечує стабільну агресивність середовища, що є критичним для порівняння портландцементу з альтернативними в'язучими [7], а також для оцінки ефективності мікроструктурних модифікаторів, зокрема хітозану [8].

Крім хімічного моделювання, надзвичайної актуальності набуває спеціалізована оцінка біогенної сульфатної корозії. Стандарт ASTM C1904 [11] пропонує стандартизовану методику визначення впливу біогенної кислоти. Проте повноцінна імітація мікробіологічно індукованої корозії (МІС) та оцінка передових стратегій мітигації корозії [9] потребує використання складних спеціалізованих біокамер. У таких камерах відтворюються реальні процеси колонізації бетону мікроорганізмами з урахуванням температури, вологості та концентрації сірководню. Саме такі комплексні випробування дозволяють довести ефективність екологічних методів захисту, зокрема біоінералізації (спрямованого осадження карбонату кальцію бактеріями) для захисту морської інфраструктури [12], а також комплексно оцінити

довговічність інноваційних матеріалів у біоагресивних середовищах [3].

ВИСНОВКИ

Узагальнення результатів аналізу нормативної бази та актуальних наукових досліджень дозволило виявити критичні обмеження класичних методів статичного випробування бетонів на сульфатостійкість, пов'язані з виникненням «бар'єрного ефекту» продуктів корозії. Встановлено, що для забезпечення достовірного прогнозування довговічності цементних композитів в агресивних середовищах доцільним є перехід до комплексних методологій. Оптимальний підхід полягає в інтеграції методів динамічного моделювання (pH-stat титрування та біокамер) з інструментальними методами мікроструктурного моніторингу. Запропонована методологічна стратегія дозволяє мінімізувати похибки лабораторного моделювання та забезпечити об'єктивну оцінку ефективності новітніх в'язучих і захисних добавок у реальних умовах експлуатації.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Chaudhari, B., Panda, B., Šavija, B., & Paul, S. C. (2022). Microbiologically induced concrete corrosion: A concise review of assessment methods, effects, and corrosion-resistant coating materials. *Materials*, 15(12), Article 4279. <https://doi.org/10.3390/ma15124279>
2. Jiang, G. (Ed.). (2023). *Microbiologically influenced corrosion of concrete sewers: Mechanisms, measurements, modelling and control strategies*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-29941-4>
3. Xiao, J., et al. (2023). Experimental study on the sulfuric acid corrosion resistance of PHC used for pipe pile and NSC used in engineering. *Buildings*, 13(7), Article 1596. <https://doi.org/10.3390/buildings13071596>
4. Wang, D., Guan, F., Feng, C., Mathivanan, K., Zhang, R., & Sand, W. (2023). Review on microbially influenced concrete corrosion. *Microorganisms*, 11(8), Article 2076. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11082076>
5. ASTM International. (2024). Standard test method for length change of hydraulic-cement mortars exposed to a sulfate solution (ASTM C1012 / C1012M-24). https://doi.org/10.1520/C1012_C1012M-24
6. European Committee for Standardization. (2003). *Products and systems for the protection and repair of concrete structures – Test methods – Resistance to severe chemical attack (EN 13529:2003)*.
7. Damion, T., & Chaunsali, P. (2022). Evaluating acid resistance of Portland cement, calcium aluminate cement, and calcium sulfoaluminate based cement using acid neutralisation. *Cement and Concrete Research*, 162, Article 107000. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2022.107000>
8. Zanette Barbieri, J. C., et al. (2024). Impact of sulfuric acid attack in Portland cement mortar mixtures with chitosan addition. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 36(11), Article 04024360. <https://doi.org/10.1061/JMCEE7.MTENG-17992>
9. Gerengi, H., Kaya, E., Solomon, M. M., Snape, M., & Koerdt, A. (2024). Advances in the mitigation of microbiologically influenced concrete corrosion: A snapshot. *Materials*, 17(23), Article 5846. <https://doi.org/10.3390/ma17235846>
10. Wang, Y., Li, P., & Wang, L. (2022). The testing methods and prediction models for concrete corrosion in sewer pipelines: A state-of-the-art review. *Journal of Testing and Evaluation*. <https://doi.org/10.1520/JTE20210702>
11. ASTM International. (2020). Standard test methods for determination of the effects of biogenic acidification on concrete antimicrobial additives and/or concrete products (ASTM C1904-20). <https://doi.org/10.1520/C1904-20>
12. Sun, X., Wai, O. W. H., Xie, J., & Li, X. (2024). Biomineralization to prevent microbially induced corrosion on concrete for sustainable marine infrastructure. *Environmental Science & Technology*, 58(1), 522–533. <https://doi.org/10.1021/acs.est.3c04680>

РЕСУРСОЗБЕРІГАЮЧА ТЕХНОЛОГІЯ ОТРИМАННЯ ГІДРАВЛІЧНОГО ВАПНА

Красулін М.О.¹, Дорогань Н.О.², Черняк Л.П.³

¹Студент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна

²К.т.н., доц., старший викладач, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна

³Д.т.н., проф., Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна

e-mail: 1. krasulin.maksim@lpi.kpi.ua, 2. nataliyadorogan@ukr.net, 3. lpchernyak@ukr.net

Анотація. Розглянуто напрямки ресурсозбереження в виробництві мінерального в'язучого матеріалу – вапна шляхом використання відходів промисловості як вихідної сировини. На основі комп'ютерних розрахунків визначено кількісні співвідношення природного карбонатного та техногенного компонентів у відповідності до значень гідралічного модуля та активності вапна.

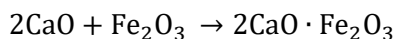
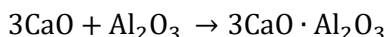
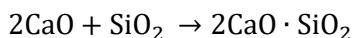
Ключові слова: вапно, сировина, відходи промисловості, випал, ресурсозбереження.

Вапно є одним з найдавніших і найпоширеніших будівельних матеріалів. Проте його виробництво пов'язано зі значними витратами природної карбонатної та паливної сировини, родовища якої є вичерпними та невідновлювальними. Це не відповідає сучасним вимогам ресурсозбереження та визначає актуальність досліджень і розробок в напрямку заміни природної сировини відходами промисловості відповідного складу.

Метою даної роботи став аналіз можливості отримання гідралічного вапна на основі бінарної композиції природної карбонатної та техногенної сировини. При цьому об'єктами дослідження стали вапняк Дубовецького родовища Івано-Франківської області та скоп [1] – відходи виробництва ПрАТ «Київський паперово-картонний комбінат».

Будівельне вапно отримують шляхом випалювання карбонатних гірських порід до видалення CO₂ [2]. Розрізняють два види вапна, залежно від того як вони поведуть себе у воді - повітряне та гідралічне.

Гідралічне вапно здатне тверднути і зберігати міцність на повітрі і у воді. Його отримують шляхом випалювання при 900-1100°C мергелистих вапняків з глинистими і піщаними домішками від 6% до 20 %. Під час випалювання ці домішки реагують з CaO, утворюючи силікати, алюмінати та ферити кальцію.



Саме ці новоутворення надають вапну гідралічних властивостей. Беліт (двокальцієвий силікат 2CaO · SiO₂) твердне повільно, але з набором міцності, трикальцієвий алюмінат (3CaO · Al₂O₃) при контакті з водою кристалізується, ферити кальцію дають стійкість до агресивних середовищ.

На відміну від повітряного вапна, гідралічне має меншу пластичність і є водостійким, після тверднення на повітрі при зануренні у воду не втрачає міцності. Реакція отримання проходить з виділенням тепла: CaO+H₂O→Ca(OH)₂+65,5 кДж

Основною відмінністю в хімічному складі повітряного і гідралічного вапна є домішки SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, вони майже відсутні в повітряному вапні, тоді як у гідралічному становлять значну кількість. Характеристикою вапна слугує гідралічний модуль НМ - співвідношення вмісту оксиду кальцію із сумарним вмістом діоксиду кремнію, оксиду алюмінію та оксиду заліза:

$$\text{HM} = \text{CaO} / \text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$$

При цьому $HM = 1,7 - 4,5$ для сильно гідралічного вапна,
 $HM = 4,5 - 9,0$ для слабо гідралічного вапна.

За хімічним складом скоп відрізняється від вапняку більшим вмістом оксидів кремнію та алюмінію при кількісному співвідношенні $SiO_2:Al_2O_3=1,3$, меншим вмістом оксиду кальцію при кількісних співвідношеннях $CaO : SiO_2 -2,5$ проти $16,9$ та $CaO : Al_2O_3 =3,3$, дещо меншим вмістом Fe_2O_3 , наявністю лужних оксидів. Крім того, слід відзначити теплотворну здатність скопу, що характеризується значеннями нижчої та вищої теплоти згорання відповідно 1117 і 4267 ккал/кг.

Відповідно до мети даної роботи було проведено розрахунки складу досліджуваних сировинних композицій для отримання гідралічного вапна з використанням комп'ютерної програми "РоманЦем" [3]. Аналіз отриманих результатів розрахунків показав, що в інтервалі значень гідралічного модуля HM від $1,7$ до $4,5$ кількісне співвідношення техногенної сировини-скопу та вапняку Cs/Cv в складі композицій зменшується з 8 до $0,6$ (рис. 1). При цьому вміст активних $CaO+MgO$, характерний для гідралічного вапна, досягається в інтервалі значень $Cs/Cv=7-8$.

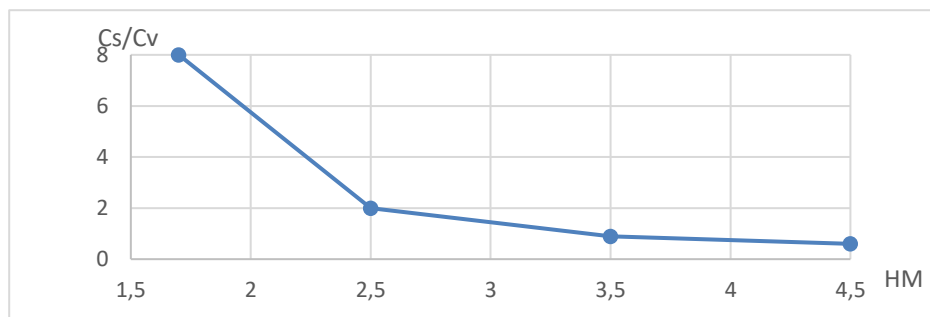


Рисунок 1 – Залежність гідралічного модуля (HM) вапна від кількісного співвідношення техногенної та природної сировини Cs/Cv

ВИСНОВКИ

Встановлено доцільність і перспективність використання багатотоннажних відходів виробництва паперу і картону – скопу як вихідної сировини для отримання гідралічного вапна як фактору ресурсозбереження, що визначається можливістю зменшення витрат природних карбонатних і паливних матеріалів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Mladenov, M., & Pelovski, Y. (2010). Utilization of wastes from pulp and paper industry. Journal of the University of Chemical Technology and Metallurgy, 45(1), 33–38.
2. Рунова, Р. Ф., Дворкін, Л. Й., Дворкін, О. Л., & Носовський, Ю. Л. (2012). В'яжучі речовини. Основа.
3. Свідерський, В. А., Черняк, Л. П., Сангінова, О. В., Дорогань, Н. О., & Цибенко, М. Ю. (2017). Програмне забезпечення технології низькотемпературних в'яжучих матеріалів. Будівельні матеріали та виробі, 1–2(93), 22–24.

ТЕМПЕРАТУРОСТІЙКІ РОЗЧИНИ ДЛЯ АНКЕРУВАННЯ

Ковальчук А.В.

Асистент, Київський національний університет будівництва і архітектури,
м. Київ, Україна

e-mail: nutrogenium@gmail.com

Анотація. Запропоновано отримання розчинів для анкерування при використанні цементних систем на основі портландцементу шляхом максимальної заміни частини клінкеру добавкою гранульованого доменного шлаку при лужній активації рідинним склом. Визначені підходи щодо регулювання міцності і власних деформацій розчинів. Розроблені розчини для анкерування характеризуються високою ранньою міцністю на стиск ≥ 10 МПа через 6 годин тверднення і ≥ 20 МПа через 1 добу, розширення 2,35 мм/м, міцністю на виривання ≥ 100 МПа і підвищеною стійкістю до високотемпературного навантаження.

Ключові слова: анкерні розчини, лужні активовані цементы, рідинне скло, гранульований доменний шлак, розширення.

В умовах воєнного часу критично важливо підвищити стійкість фортифікаційних споруд до екстремальних термосилових навантажень від вибухів та пожеж [1]. Ефективним матеріалом для їх підсилення є анкерні розчини на основі лужно-активованих шлакопортландцементів [2]. Завдяки активації силікатами натрію такі системи формують гідратні новоутворення, здатні до перекристалізації без руйнування структури при температурах понад 800 °С, що забезпечує їм високу термостійкість [3]. Проте суттєвим недоліком лужно-активованих цементів є підвищена усадка [4], тоді як для надійної фіксації анкера розчин повинен розширюватися. Оскільки традиційні засоби регулювання деформацій тут малоефективні, актуальним завданням є пошук нових рішень, таких як направлений синтез високообводнених фаз [5], підвищення ступеню закристалізованості продуктів гідратації, утримання води в структурі матеріалу та газове розширення [6].

Отримання лужно-активованих портландцементів з властивостями, затребуваними в розчинах для анкерування, які використовуються для підвищення стійкості конструкцій до високотемпературного навантаження.

Дослідження проведено на лужно-активованому шлакопортландцементі СЕМ III/A (далі, ЛШПЦ) (50 мас. % гранульований доменний шлак). Для отримання СЕМ III/A використано портландцемент СЕМ I 42,5 R та гранульований доменний шлак ($M_o = 1,11$; вміст склофазы — 84 %; питома поверхня — 400 м²/кг).

Лужним активатором слугував водний розчин силікату натрію ($\rho = 1280 \dots 1400$ кг/м³, $M_s = 1,0 \dots 3,0$). Корегування силікатного модуля здійснювали розчином NaOH ($\rho = 1400$ кг/м³) згідно з ДСТУ-Н Б В.2.7-304:2015. Для регулювання строків тужавлення до силікату натрію додавали: тринатрійфосфат ($Na_3PO_4 \cdot 12H_2O$) — 4 % від маси розчину силікату; гліцерин — 10 % від рідкої складової.

Строки тужавлення і міцність. При $M_s = 3,0$ вміст тринатрійфосфату становив 8 %, при $M_s = 1,0 \dots 1,5$ не застосовували через його нерозчинність. Зменшення густини розчину від 1400 до 1280 кг/м³ та M_s від 3,0 до 1,0 пришвидшує тужавлення ЛШПЦ: початок — із 30 до 10 хв, кінець — із 40 до 20 хв. Максимальна міцність на стиск досягається при $\rho = 1400$ кг/м³ і $M_s = 3,0$, становлячи 20,9; 37,2; 62,9 та 108,2 МПа через 3 год, 1, 3 і 28 діб відповідно.

Власні деформації. На прикладі високоактивного цементу ($\rho = 1400$ кг/м³, $M_s = 3,0$) доведено можливість регулювання деформацій шляхом поєднання газового розширення, водоутримання та направленої синтезу новоутворень. Використання комплексної добавки (гіпс напівводний 2,0 %, глиноземистий цемент 2,0 %, зола-винесення 4 %, суперадсорбент 0,4

%, алюмінієва пудра 0,08 %) узгоджує в часі процеси газовиділення з кристалізацією високообводнених AFt- і AFm-фаз. Це створює компенсуюче напруження структури без втрат міцності. Як наслідок, отримані безусадочні (+0,35 мм/м) та розширні (+2,00 мм/м) ЛШПЦ.

Високі фізико-механічні характеристики ЛШПЦ зумовлені формуванням надзвичайно щільної та монолітної мікроструктури, базовим механізмом якої є синтез низькоосновних гідросилікатів кальцію CSH(I) у поєднанні зі специфічними сферолітними целітоподібними новоутвореннями.

На відміну від традиційних цементних систем, де розширення часто супроводжується деструкцією, запропонований механізм компенсації усадки базується на синергії просторового газовиділення та швидкої кристалізації високообводнених AFt- і AFm-фаз, що створює контрольоване внутрішнє напруження без втрати міцності.

Анкерні розчини є надзвичайно затребуваними в умовах бойових дій при будівництві конструкцій, які експлуатуються при ударному навантаженні від вибухів і послідувочої дії вогню, - громадські, фортифікаційні і інженерні конструкції та інші об'єкти критичної інфраструктури.

ВИСНОВКИ

На основі ЛШПЦ використовуючи комплекс підходів до управління строками тужавлення, міцністю і власними деформаціями було розроблено анкерні суміші для підсилення термонавантажених конструкцій. Їхні фізико-механічні показники через 6 годин, 1 добу та 28 діб відповідно становлять: міцність на згин — 2,3, 2,8 та 8,6 МПа; міцність на стиск — $\geq 15,2$, $\geq 23,5$ та $\geq 45,7$ МПа; розширення дорівнює +2,35 мм/м. За нормальних умов (28 діб) міцність на виривання розробленого розчину та комерційного аналога на основі глиноземистого цементу та гіпсу становить ≥ 100 МПа, що відповідає вимогам ДСТУ Б В.2.7-126:2011. Проте після імітації пожежі ($t = 600$ °С протягом 4 год) доведено значно вищу термостійкість розробленого складу: його міцність на виривання знижується лише в 1,3 раза, тоді як міцність аналога падає у 8 разів.

Подяка. Автори висловлюють подяку Міністерству освіти і науки України за фінансову підтримку проекту з реєстраційним № 0126U000965, який виконується за рахунок бюджетного фінансування.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Kryvenko, P. V., Valerga-Puerta, A. P., Rivera-Armenta, J. L., & Vinci, A. (Eds.). (2025). Ballistic protection. Trans Tech Publications Ltd. <https://doi.org/10.4028/b-6G91y5>
2. Kryvenko, P., Rudenko, I., Sikora, P., Sanytsky, M., Konstantynovskyi, O., & Kropyvnytska, T. (2024). Alkali-activated cements as sustainable materials for repairing building construction: A review. *Journal of Building Engineering*, 90, Article 109399. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.109399>
3. Кривенко, П. В., & Пушкарьова, К. К. (1993). Довговічність шлаколужного бетону. Будівельник.
4. Zhang, B., Zhu, H., Cheng, Y., Huseien, G. F., & Shah, K. W. (2022). Shrinkage mechanisms and shrinkage-mitigating strategies of alkali-activated slag composites: A critical review. *Construction and Building Materials*, 318, Article 125993. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125993>
5. Krivenko, P., Gots, V., Petropavlovskyi, O., Rudenko, I., Konstantynovskyi, O., & Kovalchuk, A. (2019). Development of solutions concerning regulation of proper deformations in alkali-activated cements. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(6[101]), 24–32. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.181150>
6. Aydın, S. (2013). A ternary optimisation of mineral additives of alkali activated cement mortars. *Construction and Building Materials*, 43, 131–138. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.02.005>

ТЕХНОГЕННА СИРОВИНА ДЛЯ ОТРИМАННЯ ЦЕМЕНТНОГО КЛІНКЕРУ

Дорогань Н.О.¹, Черняк Л.П.², Шнирук О.М.³

¹К.т.н., доц., старший викладач, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна

²Д.т.н., проф., Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна

³Асистент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна

e-mail: 1. nataliyadorogan@ukr.net, 2. lpchernyak@ukr.net, 3. shnyruk@gmail.com

Анотація. У роботі розглянуто можливість часткової заміни природної сировини техногенними відходами під час отримання цементного клінкеру. Досліджено сировинні композиції на основі крейди та глини родовищ Рівненської області, золи виносу Бурштинської ТЕС та шлаку ПАТ «Запорізький завод феросплавів», склад яких розраховано з використанням комп'ютерної програми «Клінкер». Показано, що введення золи виносу та феросплавного шлаку впливає на хімічний склад, модульні характеристики та швидкість тужавлення матеріалу після випалу за температури 1400 °С. Встановлено, що композиція 11D має раціональніші показники та відповідає характеристикам нормальнотужавіючого в'язучого матеріалу.

Ключові слова: цемент, сировина, відходи промисловості, склад, ресурсозбереження.

Цемент є найпоширенішим мінеральним в'язучим матеріалом. Проте його виробництво пов'язано зі значними витратами природної карбонатної та глинистої сировини, родовища якої є вичерпними та невідновлювальними. Це не відповідає сучасним вимогам ресурсозбереження та визначає актуальність досліджень і розробок в напрямку заміни природної сировини відходами промисловості відповідного складу.

Метою даного дослідження став аналіз нових композицій сировинних матеріалів різного генезису для отримання цементного клінкеру за умови заміни частини компонентів природного походження відходами інших галузей промисловості. При цьому об'єктами дослідження стали крейда та глина родовищ Рівненської області, зола виносу Бурштинської ТЕС та шлак ПАТ «Запорізький завод феросплавів».

Основною складовою частиною портландцементу є клінкер, фазовий склад якого формується в процесі випалу сировинної суміші, залежить від її хіміко-мінералогічного складу, способу підготовки, режиму високотемпературної обробки та визначає якісні показники кінцевого продукту виробництва [1,2]. При цьому хімічна технологія виготовлення клінкеру характеризується високою матеріалоемністю, пов'язаною з термічною дисоціацією карбонатів при випалі вихідних сумішей на основі природної сировини, та енергоємністю, пов'язаною з високими витратами теплової енергії при випалі з максимальною температурою понад 1400 °С. Вичерпність і невідновність родовищ природної мінеральної сировини, зростаючі витрати на видобуток та вартість обумовлюють доцільність її заміни на відходи інших галузей промисловості як техногенну сировину.

Відповідно до мети даної роботи нами було розглянуто можливість збільшення об'ємів використання досліджуваних багатотоннажних відходів промисловості як техногенної сировини в складі вихідних сировинних сумішей.

Розрахунки та аналіз складу сировинних сумішей для виготовлення цементного клінкеру проводили з використанням створеної комп'ютерної програми «Клінкер» [3]. Це дозволило оперативно визначити раціональні співвідношення компонентів у вихідній сировинній суміші за заданими значеннями коефіцієнту насичення КН та кремнеземного n модулю.

Відповідно до мети даної роботи було проведено розрахунки складу досліджуваних сировинних композицій для отримання цементного клінкеру з використанням комп'ютерної програми [3]. На основі аналізу результатів розрахунків для подальшого дослідження було обрано 3-компонентні суміші, що відрізняються різновидами та вмістом відходів інших галузей промисловості (табл. 1).

Таблиця 1 - Склад сировинних сумішей

Код проби	Вміст компонентів, мас. %			
	крейда	глина	зола виносу	
			бурштинська	шлак зап
10D	77,6	19,8	2,6	-
11D	75,9	-	6,1	18,0

Отримані результати рентгенофлуоресцентного аналізу визначають відмінності хімічного складу та відповідно модульних характеристик в'язучого матеріалу після випалу з максимальною температурою 1400 °C (табл. 2). Встановлено, що проба 10D за значенням кремнеземного модуля $n=1,8$ дещо поступається рекомендованим для цементу $n=1,9-3,0$, а проба 11D повністю відповідає при $n=2,4$. Значення глиноземного модуля обох проб становлять 2,0-2,2, що відповідає рекомендованим для цементу.

Таблиця 2 – Хімічний склад матеріалу після випалу (1400 °C)

Код проби	Вміст оксидів, %								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	P ₂ O ₅
10D	29,86	10,80	5,49	0,45	47,02	0,95	3,67	1,30	0,15
11D	28,48	8,20	3,77	0,30	49,70	1,49	1,74	0,62	0,17

Згідно класифікації ДСТУ Б В.27-91-99 за швидкістю тузавлення після випалу на максимальну температуру 1400 °C проба 11D відносяться до групи нормальнотузавіючих (термін початку від 45 хв. до 2 год), характерними представниками якої вважаються портландцемент, шлакопортландцемент, пуцолановий цемент. Проба 10D відносяться до групи швидкотузавіючих (термін початку від 15 до 45 хв.), характерними представниками якої вважаються ангідритовий і глиноземистий цемент.

ВИСНОВКИ

Встановлено, що використання золи виносу та шлаку як техногенної сировини дає змогу частково замінити природні компоненти у складі сировинних сумішей для отримання цементного клінкеру. Показано, що композиція 11D на основі крейди, золи виносу та феросплавного шлаку має оптимальніші модульні характеристики: кремнеземний модуль становить $n = 2,4$, що відповідає рекомендованому діапазону для цементу. Проба 10D характеризується дещо зниженим значенням кремнеземного модуля та належить до швидкотузавіючих матеріалів, тоді як проба 11D – до нормальнотузавіючих. Отримані результати підтверджують перспективність використання досліджених промислових відходів у технології цементного клінкеру, особливо у складі композиції 11D.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Winter, N. B. (2012). *Understanding cement*. WHD Microanalysis Consultants Ltd.
2. Рунова, Р. Ф., Дворкін, Л. Й., Дворкін, О. Л., & Носовський, Ю. Л. (2012). *В'язучі речовини*. Основа.
3. Свідерський, В. А., Черняк, Л. П., Дорогань, Н. О., & Сорока, А. С. (2014). Програмне забезпечення технології портландцементу. *Будівельні матеріали та виробництво*, 1(84), 16–17.

ХІМІКО-МІНЕРАЛОГІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА ВІДХОДІВ РУЙНУВАНЬ ЯК МІНЕРАЛЬНОГО КОМПОНЕНТА ЦЕМЕНТНИХ КОМПОЗИЦІЙ

Белоград А.Ю.¹, Мельник Л.І.²

¹Аспірантка, кафедри хімічної технології композиційних матеріалів, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна

²Д.т.н., доцент, доцент кафедри хімічної технології композиційних матеріалів, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна

e-mail: 1. Anastasiya.belograd@gmail.com, 2. luba_xtkm@ukr.net

Анотація. У роботі досліджено можливість використання відходів руйнувань як мінеральної складової цементних композицій. Мета дослідження – встановлення хімічного та мінералогічного складу відходів руйнувань із різних регіонів України та оцінка можливості їх використання у порівнянні з традиційними мінеральними добавками. Проведено їх рентгенофлуоресцентний (XRF) та рентгенофазовий аналіз (XRD), та визначення міцності при стиску композицій із частковим заміщенням цементу в цементно-піщаному розчині. Виявлено високий вміст SiO₂, переважання кварцу у фазовому складі та задовільні показники міцності цементних систем з використанням досліджуваних відходів. Отримані дані є підтвердженням доцільності їх використання як мінерального наповнювача і часткового заміщення цементу в будівельних розчинах та бетонних сумішах.

Ключові слова: відходи руйнувань, цементні композиції, мінеральний компонент, рентгенофлуоресцентний аналіз, рентгенофазовий аналіз.

У сучасних умовах війни в Україні, проблема повторного використання відходів руйнувань у якості нових будівельних матеріалів набуває особливої актуальності. Такі матеріали, завдяки своєму елементному складу, формують значний ресурс вторинної мінеральної сировини для будівельної галузі [1, 2]. Одним із перспективних напрямів є їх застосування у складі цементних композицій як мінерального компонента, здатного частково замінювати портландцементний клінкер. Перспективність такого підходу для України вже відзначалася в попередніх наших дослідженнях [3]. Встановлення хімічного складу відходів руйнувань із різних регіонів України та оцінка можливості їх використання у складі бетонних сумішей та розчинів у порівнянні з традиційними мінеральними добавками.

Використано два зразки відходів руйнувань: ВРМ – відходи руйнувань з м. Миколаїв та ВРХ – відходи руйнувань з м. Харків. Для порівняння розглянуто також пуцолану, золу виносу та доменний гранульований шлак (ДГШ). Також проведено визначення міцності при стиску зразків із частковим заміщенням цементу мінеральними компонентами.

За результатами XRF-аналізу встановлено, що обидва зразки відходів руйнувань характеризуються підвищеним вмістом SiO₂ – 53,70 % для ВРМ та 55,92 % для ВРХ. Вміст CaO становить 16,08 і 13,64 % відповідно (табл. 1), а Al₂O₃ та Fe₂O₃ перебувають на рівні близько 5 і 2–3 %.

Таблиця 1 – Порівняльний оксидний склад досліджених мінеральних компонентів, мас. %

Матеріал	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	TiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	LOI
ВРМ	53,70	5,09	3,12	16,08	0,83	0,21	0,81	1,40	0,84	11,78
ВРХ	55,92	5,20	2,15	13,64	0,70	0,19	1,06	1,16	0,89	7,26
Пуцолана	47,76	5,80	2,54	23,50	0,84	0,38	0,13	1,17	0,36	17,36
Зола	44,78	19,12	9,26	3,22	1,10	1,10	0,74	2,88	0,95	0,87
ДГШ	39,39	6,80	0,38	46,76	4,87	-	0,54	0,39	1,97	0,90

У порівнянні із золою виносу досліджені відходи руйнувань містять менше Al_2O_3 та Fe_2O_3 , але істотно більше CaO , що свідчить про їх проміжне положення між алюмосилікатними та карбонатно-силікатними мінеральними компонентами. Для зразка ВРМ також характерна вища втрата при прокалюванні – 11,78 %, тоді як для ВРХ вона становить 7,26 %, що може бути пов'язано з підвищеним вмістом карбонатних фаз.

Для системного аналізу хімічного складу природних і техногенних наповнювачів та їхнього впливу на властивості ПКМ було розраховано кілька ключових індексів, що широко використовуються в матеріалознавстві, та технології силікатів. Серед них силікатний індекс ($SiO_2/(Al_2O_3+Fe_2O_3)$), алюмосилікатний індекс (Al_2O_3/SiO_2) та коефіцієнт кислотності ($SiO_2/(CaO+MgO)$). Для ВРМ ці показники становили відповідно 6,54; 0,095 і 3,18, а для ВРХ – 7,61; 0,093 і 3,90. Враховуючи те, що силікатний індекс обох зразків ($K_s > 4,5$) то їх можна віднести до групи малореакційноздатних, пасивних наповнювачів, які доцільно використовувати для створення композицій зі стабільною структурою та низькою міжфазною взаємодією.

Дані рентгенофазового аналізу показали, що основною кристалічною фазою в обох зразках є кварц з вмістом 78,11 % для ВРМ та 86,16 % для ВРХ. Окрім кварцу, у складі зразків виявлено кальцит, ангідрит, арканіт, афтіталіт, лангбейніт, а також незначні кількості портландиту, периклазу та феритової фази. Вміст кальциту у зразку ВРМ досягає 10,90 %, тоді як у ВРХ він істотно нижчий – 3,86 %, що узгоджується з результатами XRF-аналізу та значеннями втрат при прожарюванні. Відсутність аліту і беліту свідчить про те, що досліджені відходи руйнувань не можуть розглядатися як самостійне гідравлічно активне в'язуче, проте є перспективними як мінеральний наповнювач і компонент низьоклінкерних цементних систем. Оцінка фізико-механічних властивостей композицій із 50 мас.% заміною цементу показала, що суміші на основі відходів руйнувань мають вищу питому поверхню, ніж вихідний цемент СЕМ І 42.5 R: 5907 cm^2/g для ВРХ + СЕМ та 6255 cm^2/g для ВРМ + СЕМ проти 4315 cm^2/g для цементу. Міцність при стиску через 2 доби становить 12,6 МПа для композиції з ВРХ і 12,5 МПа для композиції з ВРМ, а через 7 діб – 21,1 та 20,9 МПа відповідно. За цими показниками досліджені композиції є близькими до систем із пуцоланою та золою виносу, що підтверджує можливість використання відходів руйнувань як часткової заміни цементу в композиційних матеріалах.

Отримані дані свідчать, що відходи руйнувань із Миколаєва та Харкова характеризуються близьким за типом, але відмінним за співвідношенням оксидів і фазовим складом. Високий вміст кварцу, наявність кальциту та сульфатовмісних фаз, а також задовільні фізико-механічні характеристики цементних композицій із їх використанням дають підстави розглядати такі відходи як перспективний мінеральний компонент для цементних композицій.

ВИСНОВКИ

Відходи руйнувань ВРМ і ВРХ характеризуються високим вмістом SiO_2 – 53,70 і 55,92 мас.% відповідно, що свідчить про їх кремнеземистий характер. Основною кристалічною фазою в обох зразках є кварц, вміст якого становить 78,11 мас. % для ВРМ і 86,16 мас. % для ВРХ. При 50 мас. % заміні цементу відходами руйнувань міцність при стиску через 2 доби становить 12,5–12,6 МПа, а через 7 діб – 20,9–21,1 МПа, що підтверджує можливість їх використання як мінерального наповнювача та часткової заміни цементу.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. European Commission. Construction and demolition waste.
2. World Bank, European Union, United Nations, & Government of Ukraine. (2025). *Ukraine fourth rapid damage and needs assessment (RDNA4): February 2022 – December 2024*.
3. Bielohrad, A. (2024). Assessment of the opportunities of demolition waste using as a building material of the future in Ukraine. *Technology Audit and Production Reserves*, 3(3(77)), 25–29. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2024.307317>

СЕКЦІЯ 3. Керамічні та склоподібні матеріали

УДК: 620.22

DOI: 10.20535/iwccmm2026358156

ВПЛИВ РОЗМІРУ ЧАСТИНОК НЕОРГАНІЧНОЇ СКЛАДОВОЇ НА РЕОЛОГІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ГІДРОКСИПАТИТ/ХІТОЗАН

Синиця А.О.¹, Іванченко С.Е.², Сич О.Є.³

¹PhD, старший науковий співробітник відділу функціональних матеріалів медичного призначення, Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України, Київ, Україна

²Кандидат технічних наук, старший науковий співробітник відділу фізико-хімії і технології наноструктурної кераміки та нанокомпозитів, Інститут проблем матеріалознавства ім.

І.М. Францевича НАН України, Київ, Україна

³Кандидат технічних наук, завідувач відділу функціональних матеріалів медичного призначення, Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України, Київ, Україна

e-mail: 1. synytsia.ann@gmail.com; 2. s.ivanchenko@ipms.kyiv.ua; 3. lena_sych@ukr.net

Анотація. Робота присвячена дослідженню реологічних властивостей композиційних матеріалів гідроксиapatит/хітозан (вміст хітозану 30 %) в залежності від розміру неорганічної складової. Встановлено, що незалежно від розміру наночастинок неорганічної складової, композити проявляють тиксотропну поведінку. Збільшення розміру частинок гідроксиapatиту від 9 до 40 нм сприяють збільшення в'язкості і зниження ступеня тиксотропії біокомпозитів.

Ключові слова: гідроксиapatит, хітозан, реологічні властивості, біокомпозит

Останніми роками спостерігається активний розвиток інноваційних композитних матеріалів на основі гідроксиapatиту (ГА), в яких керамічна фаза поєднується з полімерними матрицями для досягнення оптимального поєднання біологічних та механічних властивостей [1]. Такий інтерес зумовлено тим, що кісткова тканина людини – це природний біокомпозит, що складається з ~ 70% з неорганічної мінеральної фази (ГА) та ~ 30% з органічної матриці (колаген та інші біополімери) [2]. Таке поєднання відкриває широкий спектр можливостей щодо створення не лише скафордів для інженерії кісткової тканини, але і ін'єкційних матеріалів для малоінвазивного лікування в ортопедії та травматології [3]. Саме при створенні останніх важливу роль відіграють дослідження їх реологічних властивостей.

Тому метою даної роботи було дослідити вплив розміру частинок на реологічні властивості біокомпозитів ГА/хітозан.

Вихідними матеріалами був синтетичний ГА трьох типів з різним розміром частинок (Т1 – 9 ± 1 нм, Т3 – 16 ± 3 нм та Т6 – 42 ± 4 нм), отриманий гідротермальним мікрохвильовим синтезом різної тривалості [4], та комерційний хітозан Chitosan-50 ($(C_6H_{11}NO_4)_n$, $M=500.000$, Wako Pure Chemical Industries Ltd), який є природним полімером і може розглядатись як аналог колагену. Гелеподібний композит отримували гомогенізацією ГА в розчиненому хітозані.

Реологічні дослідження проводили за допомогою роторного віскозиметра Rheotest RN 4.1 (Rheotest Medingen, Німеччина) та вимірювальної системи циліндр-циліндр із зазором 1 мм між циліндрами. Для підтримки постійної температури 20 °С під час вимірювань використовували термостат Ministat 125 (Hauber, Німеччина).

Реологічні дослідження показали, що всі композити незалежно від дисперсності ГА мають сильну тиксотропну поведінку на початку вимірювань з певною точкою розриву, після якої плинність змінюється (рисунок 1). Тиксотропна поведінка течії зазвичай вказує на наявність розвиненої мережі полімерного ланцюга, елементи якої (клубки) розділяються, деформуються, а в деяких випадках розпадаються на дрібніші елементи під дією механічної сили. Для композиту ГА Т1/хітозан тиксотропна поведінка течії спостерігається до швидкості зсуву 280 c^{-1} , а від 280 до 550 c^{-1} зразок демонструє псевдопластичну поведінку течії, що вказує на розділення та зменшення взаємодії структурних елементів. В інтервалі $550\text{-}900 \text{ c}^{-1}$ спостерігається реопектична поведінка течії, що вказує на посилену взаємодію структурних

елементів, можливі зіткнення та незначне кластеризування, що дещо зменшує плинність. Від 900 до 1000 с⁻¹ матеріал повертається до псевдопластичної течії, що, ймовірно, вказує на повторне руйнування або деформацію структурних елементів.

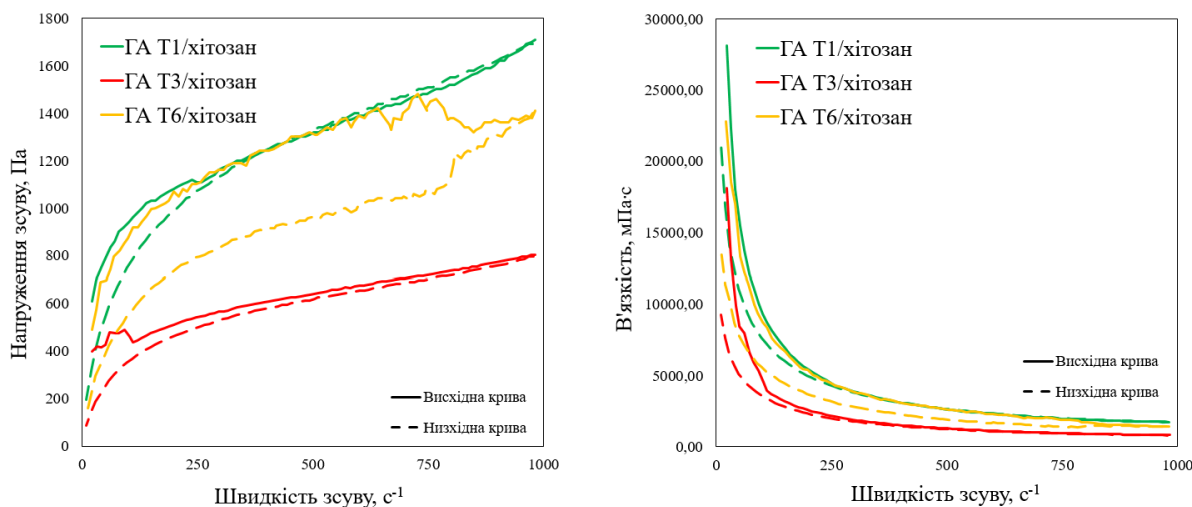


Рисунок 1 – Криві плинності та в'язкості біокompatитів на основі гідроксиапатиту та хітозану

Композит ГА Т3/хітозан демонструє тиксотропну поведінку протягом усього циклу вимірювання зі значним зниженням ступеня тиксотропії при 120 с⁻¹. ГА Т6/хітозан має подібну поведінку, але з вищою в'язкістю та зниженням ступеня тиксотропії при 850 с⁻¹. Крім того, саме останній демонструє найбільш розвинену структуру запутаного ланцюга, що потребує більшої частини зсуву для руйнування. Також крива плинності демонструє раптові сплески напруження зсуву, що, ймовірно, може вказувати на нерівномірність структури.

ВИСНОВКИ

Встановлено, що незалежно від розміру наночастинок неорганічної складової, композити гідроксиапатит/хітозан (вміст хітозану 30 %) проявляють тиксотропну поведінку. Збільшення розміру частинок гідроксиапатиту від 9 до 40 нм сприяє збільшенню в'язкості і зниженню ступеня тиксотропії композиційних матеріалів.

Подяка. Автори висловлюють щире подяку Лабораторії наноструктур Інституту фізики високих тисків ПАН за проведення досліджень в рамках Договору про наукову співпрацю.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ielo, I., Calabrese, G., De Luca, G., Conoci, S. (2022) Recent advances in hydroxyapatite-based biocomposites for bone tissue regeneration in orthopedics. *Int J Mol Sci.* 23(17), 9721. <https://doi.org/10.3390/ijms23179721>
2. Dixon, D.T., Landree, E.N., Gomillion, C.T. (2024) 3D-Printed demineralized bone matrix-based conductive scaffolds combined with electrical stimulation for bone tissue engineering applications. *ACS Appl Bio Mater.* 7(7), 4366-4378. <https://doi.org/10.1021/acsabm.4c00236>
3. Piszko, P.J., Piszko, A., Kiryk, S., et al (2024) Bone regeneration capabilities of scaffolds containing chitosan and nanometric hydroxyapatite—systematic review based on in vivo examinations. *Biomimetics.* 9, 503. <https://doi.org/10.3390/biomimetics9080503>
4. Kuśnieruk, S., Wojnarowicz, J., Chodara, A., et al. (2016) Influence of hydrothermal synthesis parameters on the properties of hydroxyapatite nanoparticles. *Beilstein J. Nanotechnol.* 7, 1586–1601. <https://doi.org/10.3762/bjnano.7.153>

УДК: 666.189.3

DOI: 10.20535/iwccmm2026355170

ВПЛИВ ХІМІЧНИХ ДОБАВОК НА ПРОЦЕС СПІНЮВАННЯ ТА ФОРМУВАННЯ СТРУКТУРИ ПІНОСКЛА

Плем'янніков О.М.¹, Трунова В.В.², Жданюк Н.В.³

¹Аспірант кафедри хімічної технології кераміки та скла, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна

²Магістрантка кафедри хімічної технології кераміки та скла, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна

³Кандидат технічних наук, доцент кафедри хімічної технології кераміки та скла, Національний технічний університет України, «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна

e-mail: 1. plemyannikov.aleksey@gmail.com, 2. trunova.valeriia@iit.kpi.ua, 3. zhdanyukn.kpi@gmail.com

Анотація. Дослідження присвячене вивченню механізмів впливу технологічних добавок на формування комірчастої структури піноскла. Проаналізовано зміну морфології пор та щільності зразків при введенні 13 хімічних модифікаторів. Визначено закономірності формування пористої структури піноскла залежно від фазового складу модифікуючих добавок, що дозволяє керувати процесами газоутворення в силікатних системах. Отримані результати є науковим підґрунтям для розробки ресурсозберігаючої технології високоякісного піноскла з прогнозованими експлуатаційними властивостями на основі скла обою листового скла та отриманню конкурентоспроможного матеріалу.

Ключові слова: піноскло, склобій, газоутворювачі, функціональні добавки, спінювання, композиційні матеріали, теплоізоляція.

Сучасні будівельні норми вимагають застосування надійних ізоляційних матеріалів із низьким водопоглинанням, негорючістю та високою довговічністю [1]. Піноскло повністю відповідає цим критеріям, проте для масового виробництва необхідно вдосконалити технологію стабілізації його властивостей. Метою роботи є встановлення впливу хімічних добавок на кінетику пороутворення та кінцеву макроструктуру теплоізоляційного піноскла.

Об'єктом дослідження є процес спінювання сировинної суміші (шихти), що складається з меленого скла та вуглецевого газоутворювача – антрациту. Для встановлення закономірностей впливу хімічної природи добавок на кінетику спінювання, було синтезовано модельні системи 13 серій: еталонний без добавок (№ 1) та 12 зразків із модифікаторами. До них увійшли: 5% та 30% природного перліту (№ 2, 3), 2% гідрофобного спученого перліту (№ 4), 2% натрій силікату розчинного Na_2SiO_3 (№ 5), 1% розчину натрій сульфату Na_2SO_4 (№ 6), 1% кальцій карбонату CaCO_3 (№ 7), 1% PbO (№ 8), 1% FeO (№ 9), 0,5% натрію гексафторосилікату Na_2SiF_6 (№ 10), 1% амоній біхромату $(\text{NH}_4)_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ (№ 11), 1% розчину борної кислоти H_3BO_3 (№ 12) та 1% розчину натрій тетраборату $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ (№ 13). Вибір модифікаторів здійснювався за можливістю розширити температурний інтервал піропластичного стану силікатного розплаву та інтенсивність газовиділення.

Експериментально доведено, що модифікатори суттєво змінюють характер пористості порівняно з еталонним зразком (№ 1), який мав об'ємну масу $0,21 \text{ г/см}^3$ і пори розміром до 2 мм. Найбільш ефективну структуру сформували зразки з борною кислотою (№ 12) та натрій тетраборатом (№ 13). Добавка 1% розчину борної кислоти забезпечила надзвичайно дрібну пористість (пори не більше 0,5 мм).

Використання 1% бури дозволило отримати об'ємну масу на рівні $0,15 \text{ г/см}^3$ із витягнутими порами довжиною 3–4 мм. Водночас введення кальцій карбонату (№ 7) та натрій сульфату (№ 6) призвело до утворення неоднорідної кавернозної макроструктури з порожнинами до 40 мм.

Зокрема, введення сполук бору було спрямоване на зниження температури розм'якшення скла, що дозволяє синхронізувати процес виділення CO/CO₂ із оптимальною в'язкістю матриці [2]. Введення борної кислоти у вигляді розчину гарантує її гомогенний розподіл на поверхні скляних зерен. Під час термічного впливу вона дегідратується, утворюючи легкоплавкий оксид бору та воду. Цей оксид швидко переходить у розплав і блокує газообмін між мікрочастинками шихти ще до моменту їх повного злипання, надійно захищаючи вуглець від завчасного окиснення [2]. Найбільш виражений ефект на формування стабільної дрібнопористої структури з високим ступенем замкненості має гідрофобний спучений перліт. На відміну від звичайного природного перліту, який провокує утворення великих каверн і надмірну крихкість матеріалу, гідрофобний аналог діє набагато ефективніше [3]. Це пояснюється тим, що немодифікований мінерал впливає переважно на в'язкість, тоді як гідрофобний спучений перліт діє комплексно: він додатково змінює поверхневий натяг і суттєво покращує адгезію між силікатною матрицею та антрацитом на ранніх етапах спінювання. Запропоновані технологічні рішення щодо оптимізації складу шихти на основі склобою забезпечують високу ресурсну ефективність виробництва. Використання розроблених комплексних добавок дозволяє отримати матеріал із конкурентною собівартістю, який за стабільністю фізико-механічних характеристик та рівномірністю пористої структури не поступається світовим аналогам. Це створює підґрунтя для рентабельного впровадження енергоефективного піноскла як довговічного утеплювача у промисловому та цивільному будівництві.

ВИСНОВКИ

У роботі здійснено комплексний аналіз 13 серій хімічних модифікаторів з метою інтенсифікації пороутворення та оптимізації структури піноскла. Встановлено, що введення активних присадок дозволяє ефективно регулювати реологічні властивості силікатної матриці та активізувати міжфазну взаємодію в системі «скло–газоутворювач». Це досягається за рахунок деструкції пасивованого поверхневого шару скляних частинок та експонування свіжоутворених поверхонь із високою реакційною здатністю. Експериментально доведено, що найбільш виражений ефект на формування стабільної дрібнопористої структури з високим ступенем замкненості пор мають: гідрофобний спучений перліт, борна кислота (H₃BO₃), натрію тетраборат (Na₂B₄O₇) та натрію гексафторосилікат (Na₂SiF₆). З'ясовані механізми впливу цих добавок дозволяють рекомендувати оптимізовані склади шихти для промислового впровадження та подальших наукових досліджень у галузі енергоефективних будівельних матеріалів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Zhdaniuk, N., Pylypenko, I., Plemianikov, O., & Sosnytsky, Y. (2025). Study of temperature regimes for the formation of the cellular structure of foam glass. *Науковий Вісник Будівництва*, 112, 412–417. <https://doi.org/10.33042/2311-7257.2025.112.1.52>
2. Zhang, Z., Liang, L., Zhang, L., Wang, Z., Xi, J., Chen, J., Cui, Z., Chai, J., & Ning, G. (2025). A review on the impact of additives in novel glass materials. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 11(2), 710–734. <https://doi.org/10.1007/s40831-025-01055-w>
3. Horonko, I., Tihomirovs, P., & Korjajkins, A. (2025). Study of Properties and Characteristics of a Foam Glass from a Mixture of Glass Shards and Perlite. *Materials*, 18(18), 4422. <https://doi.org/10.3390/ma18184422>

УДК: 666.651

DOI: 10.20535/iwccmm2026354687

ГЕТЕРОФАЗНІ ДІЕЛЕКТРИЧНІ КЕРАМІЧНІ МАТЕРІАЛИ

Борисенко О.М.¹, Логвінков С.М.², Шабанова Г.М.³, Горбунов К.О.⁴

¹*Д.т.н., професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,
Харків, Україна*

²*Д.т.н., професор, Харківський національний університет міського господарства імені О.М.
Бекетова», Харків, Україна*

³*Д.т.н., професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,
Харків, Україна*

⁴*Д.т.н., завідувач кафедри, Національний технічний університет «Харківський політехнічний
інститут», Харків, Україна*

*e-mail: 1. oksana.borysenko@khp.edu.ua; 2. Serhii.Lohvinkov@kname.edu.ua; 3.
Halyna.Shabanova@khp.edu.ua; 4. Kostiantyn.Horbunov@khp.edu.ua*

Анотація. Метою роботи є термодинамічне дослідження системи $\text{BaO-ZrO}_2\text{-TiO}_2$, встановлення особливостей її субсолідусної будови в різних температурних інтервалах та визначення термодинамічно стабільних фазових співвідношень для прогнозування складу мікрохвильових діелектричних матеріалів. Проведено тріангуляцію системи за результатами розрахунків змін енергії Гіббса для твердофазних реакцій обміну в трьох температурних інтервалах, що дало змогу встановити коноди та елементарні трикутники найбільш стабільних дво- і трифазних комбінацій сполук. Показано, що фазові співвідношення в системі залежать від температури та визначають особливості її субсолідусної будови в концентраційній області, обмеженій сполуками TiO_2 , BaTi_4O_9 , BaTi_2O_5 , BaZrO_3 , ZrO_2 і ZrTiO_4 . Отримані результати можуть бути використані для прогнозування фазового складу та розроблення мікрохвильових діелектричних керамік із регульованими електрофізичними властивостями.

Ключові слова: мікрохвильові діелектричні матеріали, фазоутворення, BaO , ZrO_2 , TiO_2

Метою роботи є термодинамічне дослідження системи $\text{BaO-ZrO}_2\text{-TiO}_2$, встановлення особливостей її субсолідусної будови в різних температурних інтервалах та визначення термодинамічно стабільних фазових співвідношень як основи для прогнозування складу і властивостей мікрохвильових діелектричних матеріалів.

Об'єкт дослідження – фазові рівноваги та субсолідусна будова системи $\text{BaO-ZrO}_2\text{-TiO}_2$ у концентраційній області, обмеженій сполуками TiO_2 , BaTi_4O_9 , BaTi_2O_5 , BaZrO_3 , ZrO_2 і ZrTiO_4 .

Мікрохвильові діелектричні матеріали є ключовим компонентом сучасних телекомунікаційних технологій, забезпечуючи стабільну і ефективну роботу бездротових мереж, супутникових систем та пристроїв Інтернету речей. Інтенсивний розвиток мобільних мереж, зокрема впровадження технологій 5G, висуває підвищені вимоги до діелектричних матеріалів, зокрема щодо мінімальних електричних втрат, високої добротності, стабільності параметрів при різних умовах експлуатації та можливості створення компактних електронних компонентів [1, 2].

У цьому контексті великого інтересу заслуговують керамічні матеріали на основі системи BaO-TiO_2 [3], які відзначаються високими діелектричними характеристиками та широкими можливостями контролю їх мікроструктури і фазового складу. Аналіз наукових джерел показує, що проміжні фази, такі як BaTiO_3 , $\text{Ba}_2\text{Ti}_9\text{O}_{20}$, $\text{Ba}_4\text{Ti}_{13}\text{O}_{30}$ та інші, володіють перспективними властивостями для використання у мікрохвильових пристроях та електронній кераміці. За рахунок регулювання фазового складу, введення легуючих добавок та додаткових компонентів, таких як скло чи інші модифікатори, можна контролювати процес росту зерен, підвищувати щільність матеріалу та покращувати його електричні характеристики.

Легування сполук системи BaO–TiO₂ оксидними добавками, такими як Sm₂O₃, ZrO₂ та MgO, забезпечує поліпшення їх діелектричних властивостей, проявляючись у одночасному збільшенні діелектричної проникності, коефіцієнта якості та стабільності при зміні температури. Цей ефект обумовлений комплексним впливом легуючих компонентів на кристалічну структуру, дефектну будову та фазові рівноваги матеріалу, включаючи стабілізацію певних фаз, зміну властивостей меж зерен і запобігання небажаним фазовим перетворенням. Саме цей ефект створює передумови для розробки нових складів і технологічних підходів у галузі радіокераміки, спрямованих на створення високоефективних мікрохвильових діелектричних матеріалів із покращеними експлуатаційними характеристиками.

Проведено термодинамічні дослідження в системі BaO–ZrO₂–TiO₂. Триангуляція системи BaO–ZrO₂–TiO₂ виконана за результатами розрахунків змін енергії Гіббса для твердофазних реакцій обміну в трьох температурних інтервалах (до 1385, 1385–1475 і вище 1475 K), що обумовлено оборотністю окремих реакцій з співіснуючою перебудовою. Для кожного інтервалу температур встановлені коноди та елементарні трикутники, що визначають найбільш термодинамічно стабільні дво- та трифазні комбінації сполук та є фізико-хімічною основою для прогнозування фазового складу матеріалів у будь-якій концентраційній області залежно від температури. Отримані результати по змінності субсолідусної будови в концентраційній області, обмеженій точками складів сполук TiO₂, BaTi₄O₉, BaTi₂O₅, BaZrO₃, ZrO₂ і ZrTiO₄, – мають не тільки теоретичне значення, а й прикладне значення, зокрема, для технологічної практики керамічних діелектриків із регульованими значеннями їх електрофізичних властивостей.

Таким чином, подальші дослідження мікрохвильових діелектричних матеріалів, зокрема керамік системи BaO–ZrO₂–TiO₂, залишаються важливим і перспективним напрямом у матеріалознавстві та електроніці. Оптимізація складу, мікроструктури та технологічних параметрів синтезу дає змогу створювати нові матеріали з покращеними діелектричними характеристиками, які відповідатимуть сучасним і майбутнім вимогам телекомунікаційних та бездротових систем.

ВИСНОВОК

У результаті термодинамічного дослідження системи BaO–ZrO₂–TiO₂ встановлено особливості її субсолідусної будови в різних температурних інтервалах та визначено термодинамічно стабільні дво- і трифазні комбінації сполук. Показано, що зміни фазових співвідношень у системі залежать від температури та можуть бути використані для прогнозування складу матеріалів у різних концентраційних областях. Отримані результати можуть бути використані для науково обґрунтованого вибору складів керамічних матеріалів у системі BaO–ZrO₂–TiO₂ та прогнозування їх фазового складу залежно від температури синтезу, що створює основу для розроблення мікрохвильових діелектричних керамік із регульованими електрофізичними властивостями, придатних для застосування в телекомунікаційних пристроях, бездротових системах зв'язку та сучасній радіоелектроніці.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Kui, J. (2026). Microwave dielectric ceramic materials and their industry development overview and future prospects. *Journal of Physics: Conference Series*, 1885, 032034. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1885/3/032034>
2. Yang, H., Zhang, S., Yang, H., Wen, Q., Yang, Q., Gui, L., Zhao, Q., & Li, E. (2021). The latest process and challenges of microwave dielectric ceramics based on pseudo phase diagrams. *Journal of Advanced Ceramics*, 10(5), 885–932. <https://doi.org/10.1007/s40145-021-0528-4>
3. Zaman, T., Koshy, P., Daniels, J. E., & Sorrell, C. C. (2025). Review of phase equilibria of the system BaO–TiO₂. *Journal of the American Ceramic Society*, 108(6), e20408. <https://doi.org/10.1111/jace.20408>

УДК: 620.22

DOI: 10.20535/iwccmm2026358151

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТИПУ СКЛА НА СТАБІЛЬНІСТЬ ШЛІКЕРІВ ДЛЯ ОТРИМАННЯ ВИСОКОПОРИСТОЇ СКЛОКЕРАМІКИ НА ОСНОВІ БІОГЕННОГО ГІДРОКСИПАТИТУ ТА СКЛА ДЛЯ ІНЖЕНЕРІЇ КІСТКОВОЇ ТКАНИНИ

Яценко А.П.¹, Сич О.Є.²

¹Кандидат технічних наук, доцент кафедри хімічної технології кераміки та скла, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

²Кандидат технічних наук, завідувач відділу функціональних матеріалів медичного призначення, Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України, Київ, Україна
e-mail: 1. ar.iatsenko@gmail.com; 2. lena.sych@ukr.net

Анотація. Робота присвячена дослідженню стабільності шлікерів протягом доби методом багаторазового розсіювання світла для отримання високопористої склокераміки на основі біогенного гідроксиapatиту в залежності від типу (складу) скла, а саме $\text{SiO}_2\text{-Na}_2\text{O-B}_2\text{O}_3$, $\text{SiO}_2\text{-Na}_2\text{O-CaO}$ та $\text{SiO}_2\text{-Na}_2\text{O-CaO}$ з додаванням 0,3% фтору. Встановлено, що шлікер, до складу якого входить найтрійборосилікатне скло, є більш стабільним у порівнянні зі шлікером, що містить фосфатне скло. Крім того, показано, що додавання фтору до складу скла сприяє кращій стабільності шлікера у порівнянні з іншими складами.

Ключові слова: гідроксиapatит, скло, шлікер, стабільність, біоматеріал

Високопориста кераміка, склокераміка та композиційні матеріали на основі гідроксиapatиту, в тому числі біогенного походження (БГА) є одними з найкращих біоактивних матеріалів, які використовуються в інженерії кісткової тканини як тимчасовий каркас для регенерації кістки [1-2].

В наших попередніх роботах було отримано на досліджено структуру та властивості склокераміки на основі БГА, а також скла систем $\text{SiO}_2\text{-Na}_2\text{O-B}_2\text{O}_3$, $\text{SiO}_2\text{-Na}_2\text{O-CaO}$ та $\text{SiO}_2\text{-Na}_2\text{O-CaO}$ з додаванням фтору [3-5], однак стабільність шлікерів для отримання цих матеріалів досліджено не було.

Тому метою даної роботи було дослідити вплив складу скла на стабільність шлікерів для отримання високопористої склокераміки.

Для отримання шлікерів було використано БГА, отриманий відпалом кісток великої рогатої худоби, а також три типи скла $\text{SiO}_2\text{-Na}_2\text{O-B}_2\text{O}_3$ (I), $\text{SiO}_2\text{-Na}_2\text{O-CaO}$ (II) та $\text{SiO}_2\text{-Na}_2\text{O-CaO}$ з додаванням 0,3% фтору (III), які отримували варкою склоутворюючих компонентів при максимальній температурі 1100 °C з подальшим подрібненням до розміру частинок ≤ 160 мкм.

Істинну густину всіх вихідних матеріалів вимірювали методом гелієвої пікнометрії (AccuPyc II 1340, Micromeritics) згідно ISO 12154:2014. Встановлено, що найвища густина характерна для БГА і складає 3,08 г/см³, для скла I – 2,51 г/см³ та скла II і III – 2,45 г/см³. Таким чином, додавання 0,3% фтору не впливає на істинну густину скла.

Шлікер отримували в планетарному млині РМ 100 (Retsch) шляхом змішування БГА, скла та води при співвідношенні БГА/скло = 60/40. Визначення стабільності шлікерів вивчали неперервно протягом доби за допомогою приладу Turbiscan Lab (Formulation), робота якого оснований на методі багаторазового розсіювання світла.

На рисунку 1 наведено кінетику дестабілізації шлікерів на основі БГА та скла протягом доби в залежності від типу застосованого скла як функцію індексу стабільності TSI (Turbiscan Stability Index) від часу. Як видно з отриманих результатів, тип (склад) скла суттєво впливає на стабільність шлікеру. Шлікер, що містить в своєму складі натрійборосилікатне скло є більш стабільним, ніж шлікер, що містить фосфатне скло. В той же час, додавання 0,3% фтору до

складу скла суттєво покращує стабільність шлікеру, до складу якого воно входить, проявляючи найкращу стабільність серед всіх шлікерів.

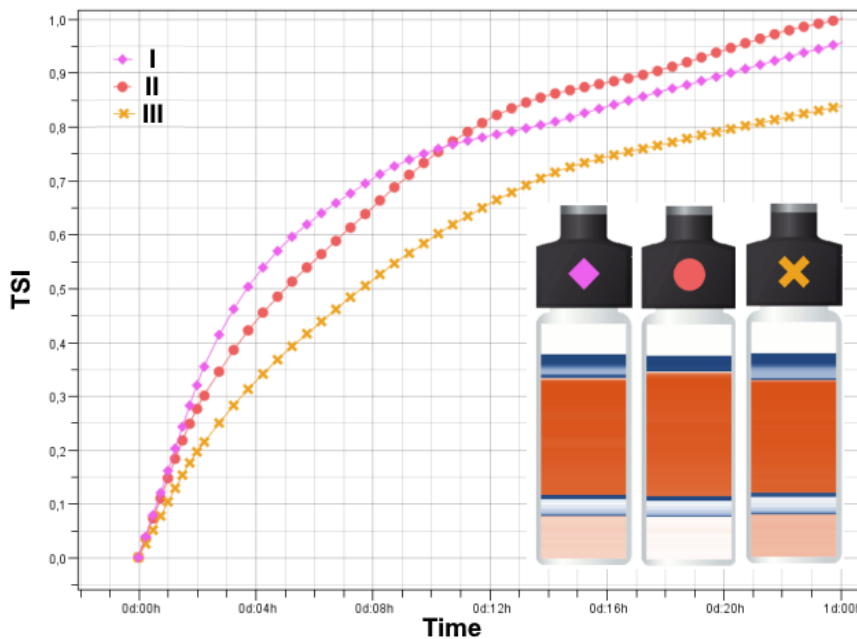


Рисунок 1 – Кінетика дестабілізації шлікерів на основі біогенного гідроксиапатиту та різного типу скла ($\text{SiO}_2\text{-Na}_2\text{O-B}_2\text{O}_3$ (I), $\text{SiO}_2\text{-Na}_2\text{O-CaO}$ (II) та $\text{SiO}_2\text{-Na}_2\text{O-CaO}$ з додаванням 0,3% фтору (III))

ВИСНОВКИ

Методом багаторазового розсіювання світла досліджено стабільність шлікерів для отримання вископористої біоактивної склокераміки на основі біогенного гідроксиапатиту та показано суттєвий вплив складу скла на стабільність шлікерів протягом доби. Показано, що шлікер, що містить у своєму складі скло $\text{SiO}_2\text{-Na}_2\text{O-B}_2\text{O}_3$, є більш стабільний, ніж шлікер, що містить скло $\text{SiO}_2\text{-Na}_2\text{O-CaO}$. Крім того, встановлено, що додавання 0,3% фтору до скла $\text{SiO}_2\text{-Na}_2\text{O-CaO}$ робить шлікер на його основі стабільнішим, ніж навіть боросилікатне скло. Таким чином, вибір скла впливає не лише на функціональні властивості вископористої склокераміки, а й на технологічні особливості отримання матеріалів.

Подяка. Автори висловлюють щире подяку Лабораторії наноструктур Інституту фізики високих тисків ПАН за проведення досліджень в рамках Договору про наукову співпрацю.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Brochu, B. M., Sturm, S. R., Kawase De Queiroz Goncalves, et. al. (2024). Advances in bioceramics for bone regeneration: A narrative review. *Biomimetics*. 9(11), 690. <https://doi.org/10.3390/biomimetics9110690>
2. Gerhardt, L. C., & Boccaccini, A. R. (2010). Bioactive glass and glass-ceramic scaffolds for bone tissue engineering. *Mater.* 3(7), 3867–3910. <https://doi.org/10.3390/ma3073867>
3. Sych, E. E., Yatsenko, A. P., Tomila, T. V., et al. (2016) Structure and properties of permeable highly porous glass-ceramics for orthopedics and traumatic surgery. *Powder Metall. Met. Ceram.* 55. 319–327. <https://doi.org/10.1007/s11106-016-9808-x>
4. Sych, O., Iatsenko, A., Tovstonoh, H., et al. (2017) Effect of fluorine addition on the structure and properties of high-porous glass ceramics for reconstructive surgery. *Funct. Mater.* 24(1), 46-51. <https://doi.org/10.15407/fm24.01.046>
5. Sych, O., Iatsenko, A., Tomila, T., et al. (2020) Effect of chitosan coating on the structure and properties of highly-porous bioceramic scaffolds for bone tissue engineering. *Nanosist., Nanomater., Nanotechnol.* 18(2), 437–447. <https://doi.org/10.15407/nmn.18.02.437>

УДК: 666.651

DOI: 10.20535/iwccmm2026354672

ЗАКОНОМІРНОСТІ ФАЗОУТВОРЕННЯ В СИСТЕМІ ZrO_2-TiO_2 ДЛЯ МІКРОХВИЛЬОВОЇ ДІЛЕКТРИЧНОЇ КЕРАМІКИ

Логвінков С.М.¹, Борисенко О.М.², Клочко Н.П.³, Кривобок Р.В.⁴

¹Доктор технічних наук, професор, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова», Харків, Україна

²Доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

³Кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

⁴Доктор технічних наук, зав, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

e-mail: 1. Serhii.Lohvinkov@kname.edu.ua; 2. oksana.borysenko@khipi.edu.ua; 3. Natalia.Klochko@khipi.edu.ua; 4. Ruslan.Krivobok@khipi.edu.ua

Анотація. Метою роботи було дослідження особливості фазоутворення матеріалів системи $ZrO_2 - TiO_2$ залежно від складу та умов термічної обробки, зокрема, при швидкісному випалі до 1300 °С. Встановлено формування метастабільних фаз на основі $ZrTiO_4$, які суттєво впливають на електрофізичні властивості матеріалів і визначають їх придатність для використання в мікрохвильових керамічних діелектриках. Показано, що керування складом і режимами синтезу дозволяє цілеспрямовано формувати структуру та властивості матеріалів для застосування у сучасних бездротових технологіях.

Ключові слова: мікрохвильові діелектричні матеріали, фазоутворення, ZrO_2 , TiO_2 , $ZrTiO_4$

Сучасний рівень розвитку промисловості та новітніх технологій зумовлює значне зростання попиту на матеріали системи $ZrO_2 - TiO_2$. Це, у свою чергу, потребує не лише розширення номенклатури їх складів, а й глибшого вивчення їх властивостей. Такий інтерес пояснюється не тільки високими показниками термічної стійкості, механічної міцності та хімічної інертності окремих оксидів, а й вираженим синергетичним ефектом їх взаємодії. Саме завдяки цьому ефекту вдається отримати бінарні композиції з унікальним поєднанням експлуатаційних характеристик, які перевищують властивості кожного з компонентів окремо.

Матеріали на основі системи $ZrO_2 - TiO_2$ мають широкий спектр перспективних напрямів практичного використання [1–3]. Зокрема, вони можуть застосовуватися як дисперсна фаза у композиційних суперсплавах із трансформаційно індукованою пластичністю типу TRIP-steel, де вони сприяють покращенню механічних властивостей і довговічності. Окрім того, ці матеріали знаходять застосування у виробництві спеціальних пігментів, таких як «блакитний рутил», що характеризуються стабільністю кольору та стійкістю до впливу зовнішніх факторів. Не менш важливою є їх роль у створенні мікрохвильових керамічних діелектриків, які використовуються в резонаторах, смугових фільтрах та інших елементах сучасних бездротових систем зв'язку. Саме цей напрям сьогодні є найбільш актуальним, що визначає наукову і практичну значущість досліджень, спрямованих на виявлення механізмів і закономірностей фазоутворення в межах цієї системи.

Встановлено, що відмінності у вихідних складах матеріалів зразків № 1 і № 2, які відповідають стехіометричним співвідношенням $ZrTiO_4$ та $ZrTi_2O_6$ відповідно, а також особливості режиму термічної обробки (зокрема швидкісний випал до температури 1300 °С без витримки при максимальній температурі) істотно впливають на формування фазового складу. За таких умов утворюються цільові фази на основі $ZrTiO_4$, які зберігаються у метастабільному стані навіть після охолодження до кімнатної температури (приблизно 12 і 17 об'ємних відсотків відповідно). Наявність цих фаз є критично важливою, оскільки саме вони

значною мірою визначають електрофізичні властивості матеріалів, необхідні для ефективної роботи мікрохвильових діелектриків.

Водночас процеси структуро- та фазоутворення в досліджених матеріалах мають складний характер і лише частково відповідають класичним закономірностям перебігу евтектоїдних реакцій. Це пояснюється тим, що синтез і подальше охолодження відбуваються в умовах термодинамічної нерівноваги, що призводить до формування нестійких або метастабільних фазових станів.

Дослідження показали, що утворення твердих розчинів на основі ZrO_2 у складі обох зразків не забезпечує стабілізації тетрагональної модифікації цього оксиду. У результаті при кімнатній температурі спостерігається переважно моноклінна фаза ZrO_2 , що має нижчу симетрію та інші фізичні характеристики.

Окрему увагу приділено аналізу гіпотези щодо утворення тетрагональної фази Zr_3TiO_8 , яка потенційно могла б розширити область твердого розчинення TiO_2 у ZrO_2 до 25 молярних відсотків. Підставою для розгляду цієї гіпотези стало виявлення характерних дифракційних максимумів у зразку № 2 при значеннях $2\theta \approx 30,60^\circ$; $35,34^\circ$; $50,68^\circ$. Проте детальніший аналіз показав відсутність достатніх доказів на її користь. Зокрема, ці піки раніше могли бути помилково інтерпретовані як ознака утворення твердого розчину $(Mg_{0,2}Zr_{0,8})O_{1,8}$. Насправді ж їх доцільніше віднести до твердих розчинів на основі $ZrTiO_4$ із підвищеним вмістом TiO_2 порівняно зі стехіометричним складом.

На відміну від цього, у зразках № 1 спостерігається формування фази $ZrTiO_4$ з незначною деформацією кристалічної ґратки (близько 0,20 %), що свідчить про близькість до стехіометричного складу та відносне збіднення на TiO_2 . Такий результат добре узгоджується з сучасними даними, отриманими на основі аналізу фазових діаграм системи $ZrO_2 - TiO_2$ [3, 4].

ВИСНОВОК

Таким чином, встановлені особливості фазоутворення в матеріалах цієї системи відкривають можливості для цілеспрямованого керування їхньою структурою та властивостями. Це, у свою чергу, дозволяє створювати керамічні матеріали з наперед заданими характеристиками, що є особливо важливим для їх використання у високочастотній електроніці та мікрохвильових технологіях.

Подяка. Дослідження здійснювалися за рахунок грантової підтримки Національного фонду досліджень України в рамках проєкту 2025.06/0063 «Технологія виготовлення термостабільної керамічної основи смугових фільтрів для систем сучасної радіокерованої техніки».

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Weigelt, C., Berek H., Aneziris, C.G., Wolf, S., Eckner, R., & Krüger, L. (2015). Effect of minor titanium additions on the phase composition of TRIP steel/magnesia partially stabilised zirconia composite materials, *Ceramics International*, 41, 2328–2335. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2014.10.040>
2. Dondi M., Matteucci, F., & Cruciani, G. (2006) Zirconium titanate ceramic pigments: Crystal structure, optical spectroscopy and technological properties. *Journal of Solid State Chemistry*, 179, 233–246. <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2005.10.032>
3. Saenko, I., Platovskaya, M., Savinykh, G., & Fabrichnaya, O. (2017). Experimental investigation of phase relations and thermodynamic properties in the ZrO_2-TiO_2 system, *Journal of the American Ceramic Society*, 101 386–399. <https://doi.org/10.1111/jace.15176>
4. Logvinkov, S. M., Borysenko, O. M., Klochko, N. P., Shabanova, H. M., & Shumeiko, V. M. (2025). The question of the ZrO_2-TiO_2 phase diagram. *Bulletin of the National Technical University «KhPI». Series: Chemistry, Chemical Technology and Ecology*, 2(14), 33–38. <https://doi.org/10.20998/2079-0821.2025.02.05>

УДК: 620.22

DOI: 10.20535/iwccmm2026358158

ОСОБЛИВОСТІ СПІКАННЯ ТА ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ БІОКЕРАМІКИ НА ОСНОВІ БІОГЕННОГО ГІДРОКСИПАТИТУ ТА ОКСИДУ ЦИРКОНІЮ

Чудінович О.В.¹, Синиця А.О.², Сич О.Є.³, Євич Я.І.⁴

¹Кандидат хімічних наук, провідний науковий співробітник відділу функціональної кераміки на основі рідкісних земель, Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України, Київ, Україна

²PhD, старший науковий співробітник відділу функціональних матеріалів медичного призначення, Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України, Київ, Україна

³Кандидат технічних наук, завідувач відділу функціональних матеріалів медичного призначення, Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України, Київ, Україна

⁴Кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник відділу фазових перетворень, Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України, Київ, Україна
e-mail: 1. chudinovych_olia@ukr.net; 2. synytsia.ann@gmail.com; 3. lena_sych@ukr.net; 4. yan_yevich@ukr.net

Анотація. Робота присвячена дослідженню особливостей спікання та фізико-механічних властивостей біокераміки на основі біогенного гідроксиapatиту та оксиду цирконію з різним співвідношенням компонентів (100/0, 75/25, 50/50, 25/75, 0/100), отриманої при 1000 °С. Встановлено суттєвий вплив складу на усадку біокераміки, яка зростає зі збільшенням вмісту оксиду цирконію. Показана ізотропність лінійної усадки зразків. Загальна пористість біокераміки на основі біогенного гідроксиapatиту та оксиду цирконію становить 32-34%, не змінюється при спіканні і не залежить від складу. При цьому механічні властивості (міцність на стиск, розтяг та модуль Юнга) в 2-3 рази перевищують властивості чистого біогенного гідроксиapatиту та оксиду цирконію і є співставними з природною кісткою, що робить їх перспективними для медичного застосування.

Ключові слова: гідроксиapatит, оксид цирконію, усадка, густина, пористість, біокераміка

Біокераміка на основі гідроксиapatиту (ГА) та оксиду цирконію (ZrO₂) є перспективним напрямом сучасного біоматеріалознавства, оскільки поєднує біологічну активність ГА з механічною міцністю ZrO₂ та може бути використана в ортопедії, травматології та стоматології [1-2]. При отриманні таких матеріалів важливим є контроль усадки при спіканні для отримання виробів необхідної форми та розмірів.

Тому метою даної роботи було дослідити вплив складу на усадку при спіканні та фізико-механічні властивості біокераміки.

Вихідними матеріалами був біогенний ГА (БГА), отриманий відпалом кісток великої рогатої худоби, а також ZrO₂, отриманий гідротермальним мікрохвильовим методом з ZrOCl₂·8H₂O та NaOH. До суспензії ZrO₂ додавали необхідну кількість БГА (таблиця 1), перемішували на магнітній мішалці протягом 120 год., центрифугували, ліофізували, пресували циліндричні зразки при тиску 150 МПа та спікали при 1000 °С.

Усадку за масою, діаметром, висотою на об'єм, а також уявну густину розраховували на основі вимірювань геометричних параметрів зразків та їх маси до та після спікання. Істинну густину вимірювали методом гелієвої пікнометрії (AccuPyc II 1340, Micromeritics) згідно ISO 12154:2014. На основі величин густин розраховували загальну пористість зразків. Механічні властивості оцінювали за допомогою випробувальної машини Ceram Test System.

Таблиця 1 – Параметри спікання та властивості зразків біокераміки

Параметри		Матеріал				
		БГА	75БГА/25ZrO ₂	50БГА/50ZrO ₂	25БГА/75ZrO ₂	ZrO ₂
Усадка, %	за діаметром	0,2	0,8	2,1	3,5	8,6
	за висотою	0,3	1,2	2,1	3,8	7,2
	об'ємна	0,7	2,4	6,3	11,9	23,7
Втрата маси, %		2,1	4,5	4,3	4,9	5,8
Загальна пористість, %		34	34	32	33	38
Міцність на стиск, МПа		45	62	92	109	34
Міцність на розтяг, МПа		10	21	20	38	7
Модуль Юнга, ГПа		4	6	9	10	3

Під час спікання БГА та ZrO₂, а також керамічні композити на їх основі зазнають втрати маси та усадки (таблиця 1). Об'ємна та лінійна усадка, а також втрата маси зразків композитів зростають зі збільшенням вмісту ZrO₂, що пов'язано з більшою усадкою чистого ZrO₂ у порівнянні з БГА. Близькі значення лінійної усадки за діаметром та висотою для всіх керамічних композитів свідчать про ізотропний характер процесу спікання. Слід зазначити, що загальна пористість керамічних композитів не змінюється під час спікання, не залежить від співвідношення компонентів і є подібною до пористості чистого БГА. Водночас пористість чистого ZrO₂ зменшується з 46 до 38 % після спікання при 1000 °С, що пов'язано з ущільненням та фазовими перетвореннями. Не зважаючи на стабільність пористості, механічні властивості отриманих зразків біокераміки на основі БГА та ZrO₂ зростають зі збільшенням вмісту оксиду цирконію, при цьому їх значенням у 2-3 рази перевищують механічні властивості чистих спечених БГА та ZrO₂. Стабільність пористості керамічних композитів, а також їх механічні властивості можуть бути пов'язані зі стабілізуючим впливом БГА, який перешкоджає фазовим перетворенням ZrO₂. При цьому оксид цирконію у складі композитів зберігає тетрагональну фазу, що суттєво впливає на механічні властивості біокераміки.

ВИСНОВКИ

Встановлено, що при спіканні біокераміки на основі біогенного гідроксиапатиту на та оксиду цирконію з різним співвідношенням компонентів при 1000 °С лінійна усадка зразків є ізотропною та зростає зі збільшенням вмісту діоксиду цирконію. Показано, що загальна пористість (32-34 %) не залежить від співвідношенням компонентів. Механічні властивості керамічних композитів в 2-3 рази перевищують властивості їх компонентів і є співставними з природною кісткою, що робить їх перспективними для медичного застосування.

Подяка. Автори висловлюють щирю подяку Лабораторії наноструктур Інституту фізики високих тисків ПАН за проведення досліджень в рамках Договору про наукову співпрацю.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Antoniac, I. (2019) *Bioceramics and Biocomposites: From Research to Clinical Practice*. Wiley-VCH: Weinheim, Germany.
2. Barabás, R., Fort, C.I., Turdean, G.L., Bizo, L. (2021) Influence of HAP on the morpho-structural properties and corrosion resistance of ZrO₂-based composites for biomedical applications. *Crystals*. 11(2), 202. <https://doi.org/10.3390/cryst11020202>

УДК: 666.3.016:666.646 (043.3)
DOI: 10.20535/iwccmm2026357291

ПОКРАЩЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ КЕРАМІЧНОЇ ПЛИТКИ З ВИКОРИСТАННЯМ ВОДОРОЗЧИННИХ ПОЛІМЕРІВ КОМПАНІЇ *LAMBERTI*

Пильник О.А.^{1,2}, Бондарєва А.І.³, Тобілко В.Ю.⁴, Демидчук Л.В.⁵

¹Здобувач 2-го рівня вищої освіти кафедри хімічної технології кераміки та скла, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

²Лаборант служби головного технолога, НСП ТОВ «ЕПЦЕНТР К». Завод керамічної плитки, смт. Калинівка, Київська обл., Україна

³PhD, старший викладач кафедри хімічної технології кераміки та скла, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

⁴Кандидат технічних наук, завідувач кафедри хімічної технології кераміки та скла, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

⁵Головний технолог, НСП ТОВ «ЕПЦЕНТР К». Завод керамічної плитки, смт. Калинівка, Київська обл., Україна

e-mail: 1,2. pylnyk.oleksandra@lll.kpi.ua; 3. a.bondarjeva@kpi.ua; 4. v.tobilko@kpi.ua; 5. leonid.demydchuk@gmail.com

Анотація. Метою роботи є дослідження впливу водорозчинних полімерів (пластифікаторів) виробництва компанії *Lamberti* (Італія) на характеристики шлікеру та фізико-механічні властивості керамічної плитки. У ході дослідження було оптимізовано склад вихідного шлікеру шляхом введення добавок PL 1185 та PL 10130, що дозволило підвищити його реологічну стабільність та покращити фізико-механічні властивості керамічного черепка. Практична цінність отриманих результатів полягає в можливості зменшення товщини керамічної плитки з 10 мм до 8 мм, що знижує витрати сировини та собівартість готової продукції без втрати її якісних характеристик.

Ключові слова: керамічний шлікер, пластифікатор, реологія, міцність на згин, водопоглинання, ресурсозбереження

Сучасні тенденції розвитку світового ринку керамічної плитки спрямовані на розширення асортименту шляхом виробництва великоформатної та потоншеної плитки (наприклад, формату 1200 x 600 мм з товщиною 3-10 мм) [1]. Однією з головних проблем технології зменшення товщини виробу при одночасному збільшенні його площі є недостатня міцність напівфабрикату після сушіння, що призводить до появи тріщин, зазубрин та збільшення відсотка браку під час глазурування та транспортування. Як наслідок, виникає необхідність у модернізації технологічного циклу, зокрема через використання функціональних добавок (пластифікаторів, дефлокулянтів тощо) на етапі приготування шлікеру.

Водорозчинні полімери, як добавки до керамічного шлікеру, забезпечують стабілізацію дисперсної системи, контроль її реологічних властивостей та формування однорідної структури напівфабрикату. Їх використання впливає не лише на поведінку глинистої суспензії, але й на характеристики прес-порошку – його сипучість, гранулометричний склад, формувальну здатність і, зрештою, на експлуатаційні властивості готової плитки.

Використання традиційних добавок (рідке скло, триполіфосфат натрію, лігносульфонат натрію) не завжди дозволяє досягти необхідних реологічних характеристик шлікеру, особливо для виробництва широкоформатної керамічної плитки. Тому актуальним науково-практичним завданням є дослідження впливу нових комерційних водорозчинних полімерів на реологічні

властивості шлікеру та фізико-механічні властивості керамічного черепка.

Для приготування вихідного керамічного шлікеру (№1) використовували вогнетривку глину DBK-1 (Sibelko) та Технік-2 (Vesco), пегматит Полонського родовища, каолін Дубрівського родовища, розріджувач у певному співвідношенні. Помел сировинних компонентів проводили в лабораторному кульовому млині впродовж 15 хв.

В якості досліджуваних водорозчинних полімерів обрано зразки серії PL компанії *Lamberti* (PL 1185 та PL 10130), які додавались до вихідного шлікеру у концентрації 0,4 %. Отримані шлікери маркувались №2 та №3, відповідно.

Густина шлікеру, його текучість та залишок на ситі 0063 визначали за стандартними методиками. Отримані результати представлені в табл. 1.

Таблиця 1 – Параметри досліджуваних керамічних шлікерів

Параметри глинистої суспензії	Вихідний шлікер №1	Шлікер №2	Шлікер №3
Залишок на ситі, %	2,2	2,2	2,2
Густина, г/см ³	1,708	1,696	1,702
Текучість, сек	28	27	29
Текучість через 5 хв, сек	32	40	39
Текучість через 15 хв, сек	43	58	61

Результати вимірювань основних характеристик шлікеру показали, що добавки не змінюють густину (1,70 г/см³) та ступінь помелу, проте впливають на його текучість після відстоювання.

Дослідження водопоглинання та границі міцності на згин керамічних плиток, отриманих на основі експериментальних шлікерів №1-3 проводили згідно з ДСТУ Б В.2.7-283:2011 «Плитки керамічні. Методи випробувань».

Аналіз отриманих даних свідчить, що введення водорозчинних полімерів у склад вихідного шлікеру сприяє ущільненню структури керамічного черепка. Це підтверджується зниженням показників водопоглинання з 1,27 % (вихідний шлікер №1) до 0,87 % та 0,98 % для зразків на основі шлікерів №2 та №3 відповідно.

Зменшення пористості матеріалу супроводжується закономірним підвищенням міцності виробів. Встановлено, що при використанні вихідного шлікеру міцність на згин становить 56,32 МПа, тоді як для шлікеру №2 даний показник зростає до 62,01 МПа, а для шлікеру №3 – до 57,14 МПа. Таким чином, найбільш ефективно зміцнення керамічної матриці (на 10,1 % відносно контролю) досягається при використанні пластифікатора PL 1185.

ВИСНОВКИ

Доведено, що полімерна добавка PL 1185 є високоефективним модифікатором, який комплексно оптимізує реологічну поведінку шлікеру та фізико-механічні характеристики готової кераміки. Встановлений ефект зміцнення структури черепка дозволяє реалізувати технологію виробництва потоншених виробів із зменшенням товщини з 10 мм до 8 мм без втрати якісних показників міцності.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Alves, C.L., Oliveira Martins Muller, J., Noni Jr., A., Heinrich, S. (2025). Challenges and opportunities for increase sustainability and energy efficiency in ceramic tile industry. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 22, 4, e15097. Doi: <https://doi.org/10.1111/ijac.15097>

УДК: 666.32:544.723:691.223

DOI: 10.20535/iwccmm2026357841

СФЕРИЧНО ГРАНУЛЬОВАНІ ПОРИСТІ КЕРАМІЧНІ МАТЕРІАЛИ НА ОСНОВІ ПРИРОДНИХ АЛЮМОСИЛКАТІВ

Пилипенко І.В.

*К.х.н., доцент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна
e-mail: i.pylypenko@kpi.ua*

Анотація. У роботі представлено розширений огляд сучасних методів синтезу та термічної стабілізації сферичної пористої кераміки на основі природних глинистих мінералів (каоолініту, монтморилоніту). Детально розглянуто механізми іотропного гелеутворення з використанням альгінату натрію як тимчасового зв'язуючого, а також вплив реологічних параметрів шлікеру на морфологію гранул. Проаналізовано фазові перетворення у глинистих матрицях при швидкісному випалі у киплячому шарі, зокрема умови формування мулітової фази. Оцінено ефективність отриманих матеріалів у процесах адсорбційного очищення води від важких металів та їхній потенціал як носіїв для промислових каталізаторів.

Ключові слова: пориста кераміка, глинисті мінерали, альгінат натрію, іотропне гелеутворення, киплячий шар, спікання, адсорбція.

Ефективність сучасних хімічних та екологічних технологій, таких як сорбційне очищення води або гетерогенний каталіз, значною мірою залежить від геометричної форми та структурної стабільності використовуваних матеріалів. Традиційні керамічні носії у вигляді циліндричних екструдатів мають ряд недоліків: нерівномірність пакування в реакторах, виникнення пристінкових ефектів та високий гідравлічний опір потоку. Найбільш критичною проблемою є схильність екструдатів до механічного стирання з утворенням пилу, що призводить до блокування системи та падіння тиску [1].

Сферична геометрія гранул є оптимальною для процесів у нерухомому та рухомому шарах, оскільки забезпечує найбільш щільне пакування та мінімальний опір течії. Використання природних глини як сировини є економічно обґрунтованим завдяки їхній доступності та здатності до пластичного формування. Проте створення високопористої кераміки, яка поєднувала б велику питому поверхню з високою механічною міцністю, потребує глибокого розуміння фізико-хімічних процесів на кожному етапі – від стабілізації суспензій до контрольованого фазового синтезу при спіканні [2,3].

Метою дослідження є систематизація технологічних параметрів формування пористих керамічних сфер методом іотропного гелеутворення, аналіз впливу температурних режимів на формування фази муліту та визначення закономірностей зміцнення гранул при швидкісному випалі у киплячому шарі для їхнього подальшого практичного застосування [2,4].

Основним методом отримання сферичних заготовок є покrapельне додавання суспензії до коагуляційної ванни. Процес базується на іотропному гелеутворенні альгінату натрію (1–3 мас.%), де іони Na^+ у структурі полісахариду заміщуються дивалентними іонами Ca^{2+} з розчину CaCl_2 . Це призводить до утворення тривимірної сітки, яка миттєво фіксує сферичну форму краплі. Встановлено, що для отримання ідеальних сфер в'язкість шлікеру має бути нижче 0.3 Па·с, а відстань від сопла до дзеркала ванни – близько 3 см. Розмір гранул (1–5 мм) прямо пропорційний діаметру сопла та поверхневому натягу суспензії [2].

Етап сушіння визначено як критичний для збереження цілісності гранул. Експериментально доведено, що використання потоку сухого газу при температурах 20–80 °С дозволяє підвищити міцність на 10–20% порівняно зі швидким нагріванням. Це пов'язано з поступовою усадкою та запобіганням передчасній дегідратації, що викликає внутрішні

напруження. При температурах спікання 500–700 °С відбувається дегідроксиляція глинистих мінералів з утворенням метафаз та подальша рекристалізація в муліт при 1000–1200 °С. Показано, що використання киплячого шару для випалу забезпечує інтенсивний теплообмін та скорочує час обробки до 20 хвилин, забезпечуючи ступінь кальцинації понад 95% [4].

Дифузійний характер іотропного гелеутворення призводить до формування градієнтної структури гранул: щільної зовнішньої оболонки та високопористого ядра. Така морфологія є надзвичайно вигідною для каталітичних застосувань, оскільки забезпечує механічну тривкість до стирання при збереженні високої швидкості масопереносу. Встановлено, що підвищення температури спікання понад 1150 °С призводить до часткової вітрифікації, що підвищує гідролітичну стабільність матеріалу в агресивних водних середовищах, проте може спричинити закриття деякої частини пор [3].

Статистичний аналіз міцності за допомогою розподілу Вейбулла показує, що керамічні сфери мають значно вищий модуль надійності порівняно з екструдатами, що обумовлено рівномірним розподілом механічних напружень у сферичних тілах. Використання добавок, таких як цеоліти, дозволяє створювати ієрархічну пористість, де глина виконує роль міцної матриці, а цеоліт забезпечує специфічну адсорбційну активність [5].

Розроблені технології дозволяють масштабувати виробництво функціональних сфер для таких галузей:

1. Екологічна інженерія: Очищення стічних вод від іонів Cd(II), Pb(II) з ефективністю до 99%, а також видалення органічних барвників.
2. Енергетика та нафтохімія: Використання як носіїв Ni та Cu каталізаторів для процесів конверсії метану та гідрування CO₂.
3. Матеріалознавство: Створення легких вогнетривких наповнювачів та компонентів для фільтрації газів при високих температурах.

ВИСНОВКИ

Комплексне використання іотропного гелеутворення та швидкісного випалу в киплячому шарі є перспективним шляхом створення сферичної пористої кераміки з керованими властивостями. Ключовими чинниками успіху є контроль реології шлікеру, м'який режим сушіння та вибір температури спікання залежно від призначення. Використання природних глинистих мінералів дозволяє отримувати екологічно безпечні адсорбенти з можливістю багаторазової регенерації.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ravindran, K., & Madhu, G. (2020b). Impact of shape and size of catalysts on the physical properties and pressure drop in fixed bed catalytic systems. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, 9(6), 1103–1109. <https://doi.org/10.35940/ijitee.f4214.049620>
2. Santos, C. J. E., Wei, T., Cho, B., & Kriven, W. M. (2013b). A forming technique to produce spherical ceramic beads using sodium alginate as a precursor binder phase. *Journal of the American Ceramic Society*, 96(11), 3379–3388. <https://doi.org/10.1111/jace.12584>
3. Klein, T. Y., Treccani, L., & Rezwani, K. (2011b). Ceramic Microbeads as Adsorbents for Purification Technologies with High Specific Surface Area, Adjustable Pore Size, and Morphology Obtained by Ionotropic Gelation. *Journal of the American Ceramic Society*, 95(3), 907–914. <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2011.04982.x>
4. Kaczyńska, K., & Pełka, P. (2024b). Experimental studies of fluidized bed calcination of granulated clay material. *Materials*, 17(10), 2185. <https://doi.org/10.3390/ma17102185>
5. Rajpoot, S., Kang, E. S., & Kim, Y. (2021b). Processing and properties of water-absorbing zeolite-based porous ceramics. *Journal of the Korean Ceramic Society*, 59(1), 94–103. <https://doi.org/10.1007/s43207-021-00160-2>

КОМПОЗИЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ
Збірник матеріалів
XV Міжнародної науково-практичної онлайн-конференції

В авторській редакції
Надруковано з оригінал-макета замовника

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Свідоцтво про державну реєстрацію: серія ДК № 5354 від 25.05.2017 р.
просп. Берестейський, 37, м. Київ, 03056

Підп. до друку _____2026. Формат 60×84^{1/16}. Папір офс. Гарнітура Times.
Спосіб друку – електрографічний. Ум. друк. арк. 14,18. Обл.-вид. арк. 21,65.
Поз. 24-3-3-012. Наклад 20 пр. Зам. № 24-57.

Видавництво «Політехніка» КПІ ім. Ігоря Сікорського
вул. Політехнічна, 14, корп. 15
03056, м. Київ
тел. (044) 204-81-78