

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ДНІПРОВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

Кваліфікаційна наукова праця

На правах рукопису

ПІЛЮГІН ЄВГЕНІЙ ДМИТРОВИЧ

УДК 624.012.45:620.178.3:678.8:536.2

ДИСЕРТАЦІЯ

**ВПЛИВ СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ МІЖФАЗНИХ ГРАНИЦЬ
СКЛОВОЛОКОННИХ АРМУЮЧИХ ЕЛЕМЕНТІВ НА МЕХАНІЧНІ ТА
ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ВЛАСТИВОСТІ КОМПОЗИТНИХ БУДІВЕЛЬНИХ
КОНСТРУКЦІЙ**

Спеціальність 132 – «Матеріалознавство»

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ Є.Д. Пілюгін

Наукові керівники:

доктор технічних наук, професор

Лаухін Дмитро Вячеславович

кандидат технічних наук, доцент

Федоряченко Сергій Олександрович

Дніпро – 2026

АНОТАЦІЯ

Пілюгін Є.Д. Вплив структуроутворення міжфазних границь скловолоконних армуючих елементів на механічні та експлуатаційні властивості композитних будівельних конструкцій – Кваліфікаційна робота на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 132 – Матеріалознавство. – Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», МОН України, Дніпро, 2026.

Дисертація є завершеною самостійною науковою роботою, в якій вирішено актуальну наукову задачу встановлення закономірностей впливу структуроутворення міжфазних границь волокно–матриця скловолоконних армуючих елементів на комплекс фізико механічних властивостей армованих бетонних конструкцій при порівнянні зі сталевую арматурою класу А500С.

У **першому розділі** на основі критичного аналізу літературних джерел систематизовано сучасний стан досліджень у галузі застосування сталеві та композитної арматури в залізобетонних конструкціях. Встановлено, що скловолоконна арматура характеризується високою корозійною стійкістю та малою питомою вагою, проте залишаються недостатньо вивченими закономірності її поведінки при термомеханічному навантаженні, зокрема в умовах пожежі. Обґрунтовано вибір для порівняльного дослідження сталеві арматури класу А500С та скловолоконної арматури діаметром 14 мм. Сформульовано мету та задачі дослідження.

У **другому розділі** наведено загальну характеристику об'єктів та напрямів дослідження. Обґрунтовано вибір для порівняльного аналізу сталеві арматури класу А500С виробництва металургійного комбінату «Криворіжсталь» та скловолоконної арматури діаметром 14 мм. Описано хімічний склад, технологію термомеханічного зміцнення та мікроструктуру сталеві арматури,

а також компонентний склад і структурні особливості скловолоконної арматури на основі полімерної матриці. Викладено методику проведення механічних, теплових та мікроструктурних досліджень.

У **третьому розділі** виконано числове моделювання пружних констант і коефіцієнтів теплового розширення скловолоконної арматури на рівні репрезентативного об'єму елемента (RVE) у середовищі ANSYS Material Designer. Побудовано дев'ять моделей для трьох типів волокна (E-, AR- та S-скло) та трьох типів полімерної матриці (вінілестерова, бензоксазинова та епоксидна) в діапазоні об'ємної частки волокна 10–70 % і температур 20–230 °C. Отримано таблицю основних пружних констант для всіх комбінацій та виділено дві найбільш перспективні.

На основі аналізу залежностей коефіцієнта теплового розширення визначено раціональні значення об'ємної частки волокна: 24 % для AR/E-скла та 17 % для S-скла. Проведено числове моделювання теплового та напружено-деформованого стану армованого бетонного кубу зі скловолоконною арматурою при термічному навантаженні за стандартом ISO 834. Встановлено, що критична температура 460 °C на рівні арматури досягається через 30 хвилин впливу пожежі, що забезпечує запас 15–20 хвилин порівняно з початком суттєвої деградації вінілестерової матриці (температура склування $T_g \approx 120$ °C). Показано, що гранична деформація бетону $\varepsilon_{s,lim} = 0,0035$ досягається раніше, ніж настає критична деградація скловолоконної арматури, що свідчить про достатній рівень безпеки конструкції.

У **четвертому розділі** проведено комплексні експериментальні дослідження та мікроструктурний аналіз. Випробування на стиск армованих бетонних зразків класу B30 розміром 100×100×100 мм з арматурними стержнями діаметром 14 мм двох типів — сталевою A500C та скловолоконною — за двома схемами (з відкритою арматурою та із захисним шаром 25 мм) показали, що зразки зі скловолоконною арматурою демонструють найвище значення міцності, при цьому визначальну роль відіграє матриця бетону, а не

тип арматури. Характер руйнування в усіх зразках є подібним: вертикальні та похилі тріщини з відколюванням бокових фрагментів.

Перевірку розподілу температури проведено на експериментальному стенді з нагрівом за ISO 834; встановлено добру збіжність результатів числового теплового розрахунку з експериментальними вимірюваннями. Після термічного впливу міцність зразків знижується у десятки разів, у бетонній матриці спостерігаються тріщини та пори.

Виконано комплексний мікроструктурний аналіз арматурних елементів до та після термічного впливу методами оптичної та скануючої електронної мікроскопії (SEM) та енергодисперсійного рентгенівського аналізу (EDX). Оптична мікроскопія сталі A500C у вихідному стані підтвердила тризонну будову поперечного перерізу: зовнішня зона мартенситу, перехідна зона бейніту та центральна зона ферито-перлітну. Після нагріву мікроструктура сталі стає однорідною ферито-перлітною зі знеуглецюванням поверхневого шару, міцність знижується у 2,5–3 рази.

Мікроструктура скловолоконної арматури у вихідному стані характеризується рівномірним розподілом волокон діаметром 22–35 мкм з поодинокими порами. SEM-дослідження виявили зони змінної щільності волокон та точкові дефекти на межі волокно–матриця. Аналіз EDX підтвердив локалізацію Si та O у зонах волокна, а C — у матриці. Після термічного впливу встановлено повну деградацію полімерної матриці: пори та тріщини вздовж меж волокно–матриця, що підтверджено хімічними картами розподілу елементів та лінійними профілями EDX.

Наукова новизна дослідження полягає у кількісному та якісному встановленні взаємозв'язку між параметрами структуроутворення міжфазних границь волокно–матриця скловолоконної арматури, пружними константами та коефіцієнтами теплового розширення композиту залежно від об'ємної частки волокна і температури, а також між мікроструктурними змінами арматурних елементів після термічного впливу і механічними та термомеханічними характеристиками залізобетонних конструкцій.

Практична значущість результатів дисертації підтверджується їх апробацією на міжнародних і всеукраїнських конференціях, публікаціями в наукових виданнях, а також можливістю впровадження розроблених інструментів у діяльність Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» та інших освітніх організацій України.

Ключові слова: скловолоконна арматура, GFRP, залізобетонні конструкції, міжфазні границі, мікроструктура, термомеханічне навантаження, числове моделювання, репрезентативний об'єм елемента, пожежне навантаження, сталь A500C, коефіцієнт теплового розширення, механічні властивості, електронна мікроскопія, енергодисперсійний аналіз.

ABSTRACT

Piliuhin Ye.D. Influence of Interfacial Boundary Formation of Glass Fiber Reinforcing Elements on the Mechanical and Operational Properties of Composite Building Structures – Qualification work in the form of a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy, specialty 132 – Materials Science. – Dnipro University of Technology, Ministry of Education and Science of Ukraine, Dnipro, 2026.

The dissertation is a completed independent scientific work that solves the topical scientific problem of establishing the regularities of the influence of fiber–matrix interfacial boundary formation of glass fiber reinforcing elements on the complex of physical and mechanical properties of reinforced concrete structures in comparison with steel reinforcement of grade A500C.

In the **first chapter**, based on a critical analysis of the literature, the current state of research in the field of application of steel and composite reinforcement in reinforced concrete structures is systematized. It is established that glass fiber reinforcement is characterized by high corrosion resistance and low specific weight; however, the regularities of its behavior under thermomechanical loading, particularly under fire conditions, remain insufficiently studied. The selection of steel reinforcement of grade A500C and glass fiber reinforcement with a diameter of 14 mm for comparative investigation is substantiated. The aim and objectives of the study are formulated.

In the **second chapter**, a general characterization of the research objects and directions is presented. The selection of steel reinforcement of grade A500C manufactured by the Kryvorizhstal metallurgical plant and glass fiber reinforcement with a diameter of 14 mm for comparative analysis is substantiated. The chemical composition, thermomechanical strengthening technology, and microstructure of the steel reinforcement, as well as the component composition and structural features of the glass fiber reinforcement based on a polymer matrix, are described. The

methodology for conducting mechanical, thermal, and microstructural investigations is outlined.

In the **third chapter**, numerical modeling of elastic constants and thermal expansion coefficients of glass fiber reinforcement was carried out at the level of the representative volume element (RVE) using ANSYS Material Designer. Nine models were constructed for three fiber types (E-, AR-, and S-glass) and three polymer matrix types (vinylester, benzoxazine, and epoxy) over a fiber volume fraction range of 10–70 % and temperatures of 20–230 °C. A table of principal elastic constants for all combinations was obtained and the two most promising combinations were identified.

Based on the analysis of the thermal expansion coefficient dependencies, rational fiber volume fraction values were determined: 24 % for AR/E-glass and 17 % for S-glass. Numerical modeling of the thermal and stress–strain state of a glass fiber reinforcement concrete cube under thermal loading according to ISO 834 was performed. It was established that the critical temperature of 460 °C at the reinforcement level is reached after 30 minutes of fire exposure, providing a margin of 15–20 minutes compared to the onset of significant degradation of the vinylester matrix (glass transition temperature $T_g \approx 120$ °C). It is shown that the ultimate concrete strain $\varepsilon_{c,lim} = 0.0035$ is reached before the critical degradation of the glass fiber reinforcement occurs, indicating a sufficient safety level of the structure.

In the **fourth chapter**, comprehensive experimental investigations and microstructural analysis were conducted. Compression tests of reinforced concrete cube specimens of class B30 with dimensions of 100×100×100 mm, reinforced with 14 mm diameter bars of two types — steel A500C and glass fiber — under two configurations (with exposed reinforcement and with a 25 mm cover layer) showed that specimens with glass fiber reinforcement exhibit the highest strength values, with the concrete matrix playing the decisive role rather than the reinforcement type. The failure pattern in all specimens is similar: vertical and inclined cracks with spalling of lateral fragments.

Temperature distribution was verified on an experimental setup with heating according to ISO 834; good agreement between the results of numerical thermal

analysis and experimental measurements was established. After thermal exposure, the strength of the specimens decreases by tens of times, and cracks and pores are observed in the concrete matrix.

A comprehensive microstructural analysis of reinforcing elements before and after thermal exposure was performed using optical microscopy, scanning electron microscopy (SEM), and energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDX). Optical microscopy of A500C reinforcing steel in the as-received condition confirmed a three-zone cross-sectional structure consisting of an outer martensitic layer, a transition bainitic zone, and a central ferrite–pearlite core. After heat treatment, the microstructure transformed into a homogeneous ferrite–pearlite structure accompanied by surface decarburization. As a result, the mechanical strength of the steel decreased by approximately 2.5–3 times.

The microstructure of glass fiber reinforcement in the initial state is characterized by a uniform distribution of fibers with a diameter of 22–35 μm and isolated pores. SEM investigations revealed zones of variable fiber density and point defects at the fiber–matrix interface. EDX analysis confirmed the localization of Si and O in the fiber zones and C in the matrix. After thermal exposure, complete degradation of the polymer matrix was established: pores and cracks along the fiber–matrix interfaces, confirmed by elemental distribution maps and linear EDX profiles.

The scientific novelty of the study lies in the quantitative and qualitative establishment of the relationship between the parameters of fiber–matrix interfacial boundary formation of glass fiber reinforcement, elastic constants, and thermal expansion coefficients of the composite as a function of fiber volume fraction and temperature, as well as between the microstructural changes in reinforcing elements after thermal exposure and the mechanical and thermomechanical characteristics of reinforced concrete structures.

The practical significance of the dissertation results is confirmed by their approbation at international and all-Ukrainian conferences, publications in scientific journals, and the possibility of implementing the developed tools in the activities of Dnipro University of Technology and other educational institutions of Ukraine.

Keywords: glass fiber reinforcement, GFRP, reinforced concrete structures, interfacial boundaries, microstructure, thermomechanical loading, numerical modeling, representative volume element, fire loading, steel A500C, thermal expansion coefficient, mechanical properties, electron microscopy, energy-dispersive analysis.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті в наукових періодичних виданнях, включених до переліку наукових фахових видань України (категорія Б)

1. Пілюгін Є.Д., Ротт Н.О. Перспективи застосування композитної арматури в будівельній галузі // Вісник ХНАДУ. – 2024. – №107. – С. 62–68. DOI: <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2024.107.0.62>.

Особистий внесок: виконано порівняльний аналіз властивостей неметалевої композитної та сталевий арматури, досліджено переваги GFRP щодо корозійної стійкості та питомої ваги, обґрунтовано перспективи застосування композитної арматури в сучасному будівництві.

2. Пілюгін Є.Д., Ротт Н.О. Вплив температури на поведінку композито-бетону: чисельне моделювання // Вісник ХНАДУ. – 2025. – №110. С. 24–32. DOI: <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2025.110.0.24>.

Особистий внесок: розроблено числову модель у середовищі ANSYS для оцінювання вогнестійкості бетонних конструкцій зі скловолоконною арматурою за стандартною кривою пожежі ISO 834; встановлено критичні температурні діапазони деградації матеріалів та оцінено ефективність захисного шару бетону.

3. Пілюгін Є.Д. Methodological principles for selecting glass fiber composite materials in reinforced structures // Збірник наукових праць НТУ «ДП». – 2025. – №83. – С. 183-191.. DOI: <https://doi.org/10.33271/crpnmu/83.183>.

Особистий внесок: виконано порівняльний аналіз сталевий та скловолоконної арматур на мікроструктурному рівні із застосуванням мікромеханічного моделювання; обґрунтовано вибір волокон типу S та AR і модифікацію матриці як засоби підвищення термічних та механічних характеристик композиту.

4. Ali M., Shams M. A., Bheel N., Almaliki A. H., Mahmoud A. S., Dodo Y. A., Benjeddou O. A review on chloride induced corrosion in reinforced concrete structures: lab and in situ investigation. RSC Advances. 2024. Vol. 14, № 50. P.

37252–37271. DOI: 10.1039/D4RA05506C.<https://doi.org/10.52150/2522-9117-2026-40-014>

Особистий внесок: самостійно розроблено інтегровану модель, що одночасно враховує теплові, механічні та мікроструктурні фактори; показано вирішальну роль мікроструктури міжфазних границь у забезпеченні термостійкості та опору втомі GFRP-арматури в бетонних елементах.

Публікації, що засвідчують апробацію матеріалів дисертації

5. Пілюгін, Є. Д., Ротт, Н. О., Бодряхо, Є. А. (2023). Effect of the use of hard round polymer rods reinforced with fiberglass on the strength and durability of concrete structures. Розробка та дизайн сучасних матеріалів та виробів: збірник наукових праць II міжнародної науково-практичної конференції (м. Дніпро, Україна, 9–10 листопада 2023 р.) (с. 66–67). URL: https://okmm.nmu.org.ua/en/files/2023/DDMMP_2023.Conference_Proceedings.pdf (Тези доповіді)

6. Ribeiro F., Correia L., Sena-Cruz J. Hybridization in FRP composites for construction: state-of-the-art review and trends. Journal of Composites for Construction. 2024. Vol. 28, № 4. DOI: 10.1061/JCCOF2.CCENG-4486.<https://okmm.nmu.org.ua/ua/files/2024/%D0%97%D0%B1%D1%96%D1%80%D0%BD%D0%B8%D0%BA%20%D1%82%D0%B5%D0%B7%202024.pdf>

7. Пілюгін, Є. Д. (2025). Перспективи застосування композитної неметалевої арматури на основі склоровінгу в будівельній галузі. Наукова весна 2025: матеріали XV Міжнародної науково-технічної конференції аспірантів та молодих вчених (м. Дніпро, Україна, 26–28 березня 2025 р.) (с. 429–430). URL: https://rmv.nmu.org.ua/ua/arkhiv-zbirok-konferentsiy/naukova-vesna-2025/Scientific_Spring_2025.pdf (Тези доповіді)

8. Пілюгін, Є. Д., Ротт, Н. О. (2025). До методики експерименту дослідження розподілу температури у середовищі з особливостями. Сучасні проблеми механіки у конструкціях спеціального призначення: збірник матеріалів міжнародної науково-технічної конференції (м. Дніпро, Україна, 26–28 березня 2025 р.) (с. 252–254). URL:

https://science.nmu.org.ua/ua/conferences/Forum_Mechanic/Zbirnyk_19_05-01.pdf

(Тези доповіді)

9. Пілюгін, Є. Д., Лаухін, Д. В. (2026). Структурні особливості будови міжфазних границь між матрицією та волокнами в композитній арматурі. Наукова весна 2026: матеріали XVI Міжнародної науково-технічної конференції аспірантів та молодих вчених (м. Дніпро, Україна, 4–6 березня 2026 р.) (с. 537–538). https://rmv.nmu.org.ua/ua/arkhiv-zbirok-konferentsiy/naukova-vesna-2026/Scientific_Spring_2026.pdf *(Тези доповіді)*

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ	2
ABSTRACT	6
СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ	10
ЗМІСТ	13
ВСТУП.....	16
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ ПОСТАНОВКА ЗАВДАНЬ ДОСЛІДЖЕННЯ	22
1.1 Аналіз об'єкта армування композитними елементами	22
1.2.1 Застосування композитної арматури у зарубіжній практиці.....	25
1.2.2 Механічні властивості та довговічність FRP	28
1.2.3 Довговічність і вплив середовища	31
1.2.4 Сумісність з бетоном	34
1.2.5 Вплив температури на арматурні матеріали	37
1.2.6 Стан нормативної бази	39
1.2.7 Узагальнення та невирішені проблеми	42
1.3 Постановка наукових завдань	44
Висновки до Розділу 1	45
РОЗДІЛ 2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	48
2.1 Обґрунтування вибору об'єктів дослідження	48
2.2 Металева арматура: склад, структура та технологія виготовлення	49
2.3 Скловолоконна арматура: склад, архітектура та технологія виготовлення	51
2.4 Методики випробувань композитної скловолоконної арматури	55
2.5 Методики випробувань металевої арматури класу A500C.....	56

2.6 Методика чисельного моделювання в ANSYS	57
2.7 Методика випробувань залізобетонних зразків на статичний стиск.....	58
2.8 Методика температурних випробувань	59
2.9 Методика оптичної та растрової електронної мікроскопії	60
РОЗДІЛ 3 МОДЕЛЮВАННЯ АРМОВАНИХ БЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ У ТЕРМОМЕХАНІЧНОМУ ПОЛІ (ТЕРМОМЕХАНІЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ АРМОВАНИХ БЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ).....	61
3.1 Вихідні дані та аналітичне визначення.....	62
3.2 Аналітичні моделі термомеханічної та втомної деградації властивостей GFRP-арматури.....	85
3.3 Чисельне моделювання поведінки бетонного зразка з GFRP-арматурою за стандартною кривою ISO 834	88
Висновки за розділом.....	95
РОЗДІЛ 4 ПОРІВНЯЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ ТА ТЕРМОСТІЙКОСТІ СТАЛЕВОЇ Й КОМПОЗИТНОЇ АРМАТУРИ	98
4.1 Структурутворення з перерізу термозміцненої арматури класу A500C стан поставки	98
4.1. Макро та мікроструктура, розміри структурних шарів термічно зміцненої арматури	99
4.2 Структурутворення з перерізу композитної арматури, стан поставки	107
4.3 Порівняльний аналіз випробувань залізобетонних і експериментальних зразків зі скловолоконною арматурою в лабораторних умовах на статичний стиск.....	110
4.3.1 Виготовлення та підготовка дослідних зразків.....	110
4.3.2 Експериментальне дослідження міцності зразків з різними типами армування.....	112

4.3.3 Результати досліджень на статичний стиск зразків з різними типами армування.....	114
4.3.5 Дослідження характеру розповсюдження крихкої тріщини експериментальних зразків з бетону з різними типами армування при випробування на стиск.....	116
4.4 ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПОВТОРНОГО НАГРІВАННЯ НА СТРУКТУРУ ТА ВЛАСТИВОСТІ ТЕРМІЧНО ЗМІЦНЕНОЇ СТЕРЖНЕВОЇ АРМАТУРИ КЛАСУ A500C.....	118
4.5 Дослідження впливу високотемпературного нагрівання на структуру та властивості композитної арматури.....	120
4.6 Електронно-мікроскопічні дослідження сталеві арматури після нагрівання.....	122
4.7 EDX-аналіз залізної арматури після нагрівання	124
4.8 Електронно-мікроскопічні дослідження композитної арматури після нагрівання.....	128
4.9 EDX-аналіз композитної арматури	130
4.9.1 Елементний склад у стані поставки	130
4.9.2 Елементний склад після витримки у складі бетонних зразків	134
4.10 Порівняльний аналіз впливу повторного нагрівання на структуру сталеві та композитної арматури.....	142
Висновки за розділом.....	145
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	148
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	151
ДОДАТОК А.....	164
ДОДАТОК Б	168

ВСТУП

Актуальність теми роботи. Залізобетонні конструкції є основним конструктивним матеріалом у сучасному будівництві і широко застосовуються при зведенні будівель, мостів, тунелів, підземних споруд та об'єктів інфраструктури, що експлуатуються в агресивних середовищах. Традиційне армування сталевими стержнями класу A500C, попри високі механічні характеристики, є вразливим до корозійного руйнування, що суттєво скорочує термін служби конструкцій та призводить до значних витрат на їх технічне обслуговування і ремонт.

Альтернативою є застосування склопластикової (GFRP) арматури, яка характеризується стійкістю до корозії, малою питомою вагою та високою міцністю на розтяг. Разом з тим діюча нормативна документація не містить достатньо обґрунтованих вимог щодо застосування GFRP-арматури в умовах термомеханічного навантаження, зокрема при пожежі, оскільки залежності між структурою міжфазних границь волокно–матриця та комплексом фізико-механічних властивостей композиту в широкому діапазоні температур залишаються недостатньо вивченими. Тому робота, спрямована на встановлення закономірностей впливу структуроутворення міжфазних границь скловолоконних армуючих елементів на комплекс фізико-механічних властивостей залізобетонних конструкцій при порівнянні зі сталевією арматурою класу A500C, є актуальною.

Тема дисертаційної роботи затверджена на засіданні Вченої ради Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» (протокол № 15 від 24 вересня 2025 року).

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Результати досліджень увійшли та були прийняті до уваги при оновленні освітньо-наукової програми підготовки докторів філософії за спеціальністю 132 «Матеріалознавство». Крім того, результати наукових досліджень увійшли до методичних розробок для підготовки магістрів спеціальності 132

Матеріалознавство: «Кваліметрія та контроль якості матеріалів і виробів» (2025), «Фізичні властивості і методи дослідження матеріалів» (2025), а також до методичних рекомендацій «Сучасні методи дизайну» (2025).

Мета і завдання дослідження. Фізико-математичне моделювання ефективності застосування композитної скловолоконної арматури в армованих конструкціях широкого кола призначення.

Для досягнення мети вирішено наступні завдання:

1. Провести порівняльний аналіз мікроструктури та хімічного складу міжфазних границь сталеві арматури класу A500C і композитної скловолоконної арматури у вихідному стані методами металографічного аналізу, скануючої електронної мікроскопії та EDX-аналізу.

2. Дослідити вплив температурного навантаження на фазові перетворення структурного складу сталеві та скловолоконної арматури.

3. Визначити методом чисельного моделювання основні константи для дев'яти комбінацій скловолоконно–матриця при об'ємному вмісті волокон 10–70% та температурах 20–230 °C, а також встановити раціональний діапазон об'ємного вмісту за критерієм термомеханічної сумісності скловолоконної арматури з бетонною матрицею.

4. Методом скінчених елементів виконати моделювання температурного поля та термомеханічної поведінки залізобетонних конструкцій із сталеві та скловолоконною арматурою при нагріванні з визначенням критичних температурних меж деградації несучі здатності та оцінкою захисної функції бетонного шару.

5. Провести експериментальні випробування на стиск зразків бетону класу B30 зі сталеві та скловолоконною арматурою, встановити вплив типу несучі арматури на комплекс механічних характеристик та характер армування на несучу здатність та характер руйнування армування поверхонь конструктивних елементів.

Об'єктом дослідження є процес структуроутворення та деградації комплексу фізико-механічних властивостей сталеві та композитної

скловолоконної арматур, у бетонних конструкціях після впливу зовнішнього навантаження

Предметом дослідження є взаємозв'язок між структурою міжфазних границь скловолоконних армуючих елементів, хімічним складом компонентів та механічними й експлуатаційними властивостями армованих бетонних конструкцій під дією зовнішнього навантаження.

Методи дослідження. У роботі використано сучасні методи і методики досліджень: кількісний та якісний металографічний аналіз; растрова електронна мікроскопія із застосуванням EDX-аналізу; механічні випробування; статистичний аналіз масивів експериментальних даних; чисельне моделювання методом скінченних елементів.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. *Вперше* проведено комплексне порівняльне дослідження еволюції мікроструктури сталеві арматури A500C і скловолоконної арматури при нагріванні за стандартною кривою ISO 834, що дозволило встановити принципово відмінні механізми термічної деградації двох типів армування: сталева арматура зазнає повної втрати ефекту термомеханічного зміцнення — вихідна п'ятизонна мартенситно-бейнітна будова заміщується рівноважною ферито-перлітною структурою з укрупненими зернами при збереженні хімічного складу та конструктивної цілісності; скловолоконна арматура втрачає здатність до спільної роботи волокон і матриці внаслідок незворотньої термічної деструкції полімерного сполучного при збереженні геометрії та механічних характеристик армувальних волокон, що визначає принципово різну пожежну поведінку цих матеріалів у армованих бетонних конструкціях.

2. *Набули подальшого розвитку* аналітичні моделі термомеханічної деградації властивостей скловолоконної арматури шляхом поєднання експоненційної функції зниження модуля пружності $E(T) = E_0 \cdot \exp(-\alpha(T-T_0))$ з узагальненим конститутивним рівнянням, що враховує одночасний вплив температури, об'ємного вмісту волокон V_f та циклічного навантаження; встановлено, що параметр деградації α суттєво залежить від типу матриці та

визначається температурою склування T_g (120–230 °C для вінілестеру, бензоксазину та епоксиду відповідно), а критичний поріг інтенсивного зниження жорсткості відповідає діапазону $T = 0,8–1,0 \cdot T_g$, що дозволяє прогнозувати залишкову несучу здатність армувального елемента при термомеханічному навантаженні.

3. *Вперше* на основі RVE-моделювання в ANSYS Material Designer визначено ефективні інженерні константи (E , G , ν , КТР, теплопровідність) для дев'яти комбінацій скловолокно/матриця (E/AR/S-скло $\times$ вінілестер/бензоксазин/епоксид) при об'ємному вмісті волокон 30–70% та температурах 20–230 °C, що створює науково обґрунтовану базу для вибору раціонального складу скловолоконної арматури.

4. *Набуло подальшого розвитку* встановлено діапазони раціонального об'ємного вмісту волокон 17 – 32 % для AR та E-скла, 17 % для S-скла за критерієм мінімального розузгодження коефіцієнтів теплового розширення скловолоконної арматури та бетонної матриці, що забезпечує збереження адгезійного з'єднання при термомеханічному навантаженні.

5. *Вперше* методами скануючої електронної мікроскопії та EDX-аналізу (точковий, лінійний профіль та картування елементів) кількісно охарактеризовано розподіл хімічних елементів на міжфазних границях волокно–матриця у скловолоконній арматурі в трьох станах: у стані поставки (Si 26–33 %, Ca 17–22 %, Al 6–8 % у зонах волокон; C >73 % у зонах матриці), після 28-добової витримки у складі бетонних зразків (розподіл Si, Ca, Al та C залишається незмінним — деградації міжфазної зони не виявлено) та після нагрівання до 1000 °C (вміст C у зонах матриці зростає до 54–77 %, O — до 36–42 %, Si та Ca практично зникають), що дозволило кількісно встановити зв'язок між карбонізацією полімерного сполучного та руйнуванням адгезійного шару волокно–матриця як визначального механізму втрати механічних властивостей композиту при пожежному навантаженні.

Практична значимість одержаних результатів. Результати дисертаційної роботи спрямовані на розширення областей застосування

скловолоконної арматури у бетонних конструкціях. Розроблено порівняльну базу даних фізико-механічних властивостей сталеві арматури А500С та дев'яти варіантів скловолоконної арматури, яка може бути безпосередньо використана проектувальниками при виборі типу армування залежно від умов експлуатації. Встановлені критичні температурні межі деградації скловолоконної арматури ($T_g \approx 120\text{ }^{\circ}\text{C}$ — початок розм'якшення матриці; $200\text{--}250\text{ }^{\circ}\text{C}$ — критичне зниження несучої здатності) дозволяють обґрунтовано призначати товщину захисного бетонного шару та засоби вогнезахисту для конструкцій із композитним армуванням.

Верифіковані скінченноелементні моделі можуть застосовуватися проектними організаціями для чисельної оцінки вогнестійкості залізобетонних елементів без проведення повномасштабних вогневих випробувань.

Результати EDX-аналізу міжфазних границь та встановлені закономірності їх зміни при термічному впливі можуть бути використані виробниками композитної арматури для вдосконалення технологій виготовлення.

Отримані дані можуть слугувати підґрунтям для розроблення національних нормативних документів щодо застосування GFRP-армування в будівельних конструкціях підвищеної вогнестійкості.

Результати роботи впроваджено в освітній процес НТУ «Дніпровська політехніка» (три навчально-методичні розробки) та у виробничу діяльність ТОВ «Євроспейс», що підтверджується відповідними актами впровадження.

Особистий внесок здобувача. Основні результати дисертаційної роботи були отримані здобувачем самостійно. При проведенні досліджень, результати яких опубліковані у співавторстві, здобувачеві належать: розробка та верифікація числових моделей; проведення числового моделювання теплового та напружено-деформованого стану конструкцій; виконання та інтерпретація результатів мікроструктурних досліджень арматурних елементів; проведення комплексу механічних випробувань армованих бетонних зразків до та після

термічного впливу; аналіз EDX-карт розподілу хімічних елементів та формування основних висновків.

Апробація результатів дисертаційного дослідження. Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на таких наукових заходах: 2nd International Scientific and Practical Conference «Development and Design of Modern Materials and Products» (м. Дніпро, Україна, 2023 р.); 3rd International Scientific and Practical Conference «Development and Design of Modern Materials and Products» (м. Дніпро, Україна, 2024 р.); XV Міжнародній науково-технічній конференції аспірантів та молодих вчених «Наукова весна» (м. Дніпро, Україна, 2025 р.); Міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні проблеми механіки у конструкціях спеціального призначення» (м. Дніпро, Україна, 2025 р.); XVI Міжнародній науково-технічній конференції аспірантів та молодих вчених «Наукова весна» (м. Дніпро, Україна, 2026 р.).

Публікації. За результатами дисертаційного дослідження опубліковано 9 наукових праць, у тому числі 4 статті у наукових фахових виданнях України категорії Б та 5 тез доповідей на міжнародних науково-технічних конференціях.

Структура та обсяг роботи.

Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертації становить 171 сторінок, у тому числі 48 рисунків та 14 таблиць. Список використаних джерел містить 112 найменувань на 12 сторінках

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ ПОСТАНОВКА ЗАВДАНЬ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Аналіз об'єкта армування композитними елементами

Армування бетонних конструкцій є одним із ключових конструктивних прийомів сучасного будівництва, що визначає довговічність, надійність та експлуатаційну безпеку споруд. Традиційно основним матеріалом для підсилення залізобетону виступає сталевая арматура, яка поєднує високу міцність на розтяг та пластичність, а також характеризується сумісністю з бетонною матрицею завдяки близьким коефіцієнтам теплового розширення. Саме завдяки цим властивостям залізобетон протягом десятиліть залишається домінуючим будівельним матеріалом для зведення конструкцій різного функціонального призначення [1, 2, 3].

Разом із тим сталевая арматура має низку суттєвих обмежень. Найбільш критичним чинником є схильність до корозії, що особливо інтенсивно проявляється за умов підвищеної вологості або впливу агресивних хімічних середовищ. Деградація арматури внаслідок корозійних процесів призводить до зниження несучої здатності конструкцій задовго до завершення їхнього розрахункового строку служби. Додатковим обмеженням є значна густина сталі, що збільшує масу конструкцій та, відповідно, навантаження на фундамент і витрати на транспортування. У низці випадків суттєвими недоліками виступають висока теплопровідність і наявність магнітних властивостей, які обмежують застосування сталевої арматури у спеціальних спорудах, зокрема медичних та оборонних об'єктах [4, 5].

Розвиток матеріалознавства та полімерної хімії у другій половині ХХ століття зумовив появу армуючих елементів на основі композитів. Найбільш поширеними серед них стали стрижні зі скловолокна, базальтового та

вуглецевого волокон, об'єднаних термореактивною полімерною матрицею. Такі матеріали демонструють принципово інший комплекс властивостей у порівнянні зі сталлю: вони у декілька разів легші, що спрощує транспортування та монтаж, а також відзначаються високою корозійною стійкістю навіть за умов тривалої експлуатації у вологих та агресивних середовищах. Низька теплопровідність і немагнітність відкривають можливості застосування композитної арматури у галузях, де використання сталі є обмеженим, наприклад, у медичних закладах чи об'єктах електротехнічної інфраструктури [6, 7].

Водночас композитна арматура має низку недоліків. Її робота характеризується лінійно-пружною поведінкою аж до моменту руйнування, що позбавляє конструкцію стадії пластичних деформацій та унеможливорює завчасне виявлення критичного стану. Модуль пружності полімерних композитів є нижчим за сталевий, унаслідок чого конструкції з таким армуванням можуть демонструвати підвищені прогини. Крім того, істотним обмеженням є обмежена термостійкість: полімерна матриця починає руйнуватися вже за температур 250–300 °C. Винятком є вуглепластикові стрижні, які демонструють підвищену жорсткість та термостійкість, проте їх застосування обмежене високою вартістю [8].

Поведінка конструкцій, армованих сталлю та композитами, значною мірою залежить від умов експлуатації. У вологих середовищах сталева арматура швидко зазнає корозійної деградації, тоді як композитні стрижні залишаються інертними. У середовищах із підвищеною агресивністю (солі, кислоти) композити перевершують сталь за довговічністю. Водночас за дії високих температур саме сталь зберігає несучу здатність триваліше, тоді як композити деградують значно швидше. Отже, вибір типу арматури має базуватися на конкретних експлуатаційних умовах і не може бути універсальним [9, 10].

Сучасна будівельна практика демонструє, що сталева арматура й надалі переважає у масовому житловому та промисловому будівництві завдяки

перевіреній технології, нормативному забезпеченню та економічній доцільності. Натомість композитна арматура знаходить ефективне застосування у спорудах, де вирішальними є корозійна стійкість, зменшення ваги або специфічні експлуатаційні вимоги. Прикладами виступають мости, гідротехнічні споруди, дорожні конструкції та об'єкти спеціального призначення, для яких критично важливими є немагнітність і стійкість у складних середовищах [11, 12].

Для систематизації відмінностей між різними видами армуючих матеріалів доцільним є використання узагальненої порівняльної схеми, що відображає ключові відмінності між сталевую та композитною арматурою (таблиця 1.1).

Таблиця 1.1 – Порівняння характеристик металевої та композитної арматури [1, 8, 13, 14]

Властивість	Сталева арматура	GFRP	BFRP	CFRP	HFRP
Міцність на розтяг, МПа	400–600	900–1050	1000–1200	1200–1600	1000–1400
Модуль пружності, ГПа	≈200	45–70	50–70	70–140	60–120
Гранична деформація, %	5–10	1.5–2.2	1.5–2.0	1.2–1.6	1.5–2.0
Міцність на зсув, МПа	>250	110–240	120–250	200–300	200–280
Адгезія до бетону, МПа	12–20	11–14	12–16	14–18	13–17
Стійкість до корозії	0,05-0,1	0	0	0	0

(швидкість корозії мм/рік)					
Термостійкість, °C	До 600	До 250–300	До 300–350	До 400	До 300–350
Водопоглинання, %	—	0.2–0.3	0.2–0.4	<0.2	0.2–0.3
Коеф. теплового розширення, $\times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	~12	6–26	7–20	0–2	5–15
Маса (відн. до сталі)	1.0	0.2–0.25	0.25	0.2	0.2–0.3

Проведений аналіз свідчить, що традиційна сталева та сучасна композитна арматура мають принципово відмінні сфери ефективного застосування. Сталеві стрижні забезпечують високу надійність і пластичність, однак поступаються композитам за довговічністю в умовах агресивних середовищ. Композитні матеріали, у свою чергу, демонструють корозійну стійкість та знижене питоме навантаження на конструкцію завдяки низькій густині, проте залишаються вразливими до дії підвищених температур і характеризуються крихким характером руйнування.

1.2.1 Застосування композитної арматури у зарубіжній практиці

Розвиток технологій волокнистих полімерних матеріалів став одним із найбільш вагомих досягнень сучасного будівельного матеріалознавства. Вже у 1980–1990-х роках у США та Канаді розпочалися перші масштабні експериментальні програми із застосування склопластикової арматури у транспортних спорудах. Необхідність упровадження нових матеріалів була зумовлена передусім проблемою корозійного руйнування сталевих арматур у

мостах та гідротехнічних об'єктах, що спричиняло суттєві економічні збитки та зниження експлуатаційної безпеки конструкцій [15].

У Канаді було сформовано перші нормативні документи, які регламентували використання армування на основі полімерних композитів. Зокрема, слід відзначити стандарти CSA S806 Design and Construction of Building Components with Fibre-Reinforced Polymers та CSA S807 Specification for Fibre-Reinforced Polymers. Вони визначили вимоги до властивостей FRP-матеріалів, методів їх випробувань і підходів до проєктування, створивши першу комплексну нормативну базу для практичного впровадження. Польові спостереження за станом мостів, у яких застосовувалася склопластикові арматура (GFRP), підтвердили високу стабільність матеріалу: після понад 15 років експлуатації втрати міцності виявилися мінімальними, тоді як сталеві арматура в аналогічних умовах зазнала б суттєвої деградації [12, 16, 17, 18].

У США ключовим документом став посібник ACI 440 Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars. Особлива увага приділялася мостам, що експлуатуються у середовищі з високою вологістю, перепадами температур та дією хлоридів із протиожеледних реагентів. Дослідження у межах програми RE-CAST (Research on Concrete Applications for Sustainable Transportation) підтвердили довговічність GFRP: після 17 років експлуатації у різних кліматичних зонах втрата міцності склала лише близько 2%. Це стало підґрунтям для активного поширення композитної арматури у мостобудуванні, зокрема у штатах Вірджинія, Айова та Колорадо [8, 12, 19].

Європейські країни також демонструють поступове зростання масштабів застосування полімерних композитів. Організацією Fédération Internationale du Béton (fib) було розроблено рекомендації з проєктування елементів, армованих FRP. Значного поширення набуло використання базальтопластикової арматури у північних країнах (Норвегія, Швеція, Фінляндія), де основною проблемою є цикли заморожування–відтавання. В умовах, що призводять до деградації бетону та корозії сталі, базальтопластикові матеріали зберігають стабільність властивостей [20, 21, 22].

У Японії ще у 1990-х роках проводилися масштабні експерименти з вуглепластиковою арматурою (CFRP), що отримала застосування у сейсмостійкому будівництві. Завдяки високій жорсткості та міцності CFRP-стрижні стали ключовим елементом у мостах та висотних спорудах, де вирішальним є забезпечення надійності під час землетрусів та інших динамічних впливів [23].

Останнє десятиліття характеризується появою інноваційних підходів. У Німеччині (RWTH Aachen, TU Dresden) активно розробляється концепція текстильно-армованого бетону (TRC), у якій застосовуються сітки зі скляних або вуглецевих волокон. Це дозволяє створювати надтонкі фасадні й плитні елементи зі зменшеною товщиною при збереженні несучої здатності. В університетах Швейцарії (ETH Zurich) впроваджено метод Smart Dynamic Casting (SDC), який поєднує технології 3D-друку та ковзної опалубки. Такий підхід відкриває можливість інтеграції FRP-армування безпосередньо у процесі формування конструкції, що підвищує точність та знижує матеріальні втрати [24, 25, 26, 27, 28, 29, 30].

Значну увагу привертають термопластичні FRP-стрижні, які, на відміну від терморезистивних, можуть набувати необхідної форми після виробництва під дією тепла. Це спрощує монтаж і зменшує потребу у складних стикових рішеннях. Перші експериментальні зразки балок із такою арматурою підтвердили відповідність стандартам AASHTO, що вказує на перспективність напрямку [11, 31, 32, 33].

Окрему групу становлять гібридні стрижні (Hybrid FRP, або SFCB — Steel-FRP Composite Bars), які поєднують склопластикову оболонку зі сталевим ядром. Такі матеріали інтегрують корозійну стійкість FRP із пластичністю сталі, що забезпечує підвищену втомну міцність і надійність в агресивних середовищах [34, 35, 36, 37].

Сучасний етап розвитку характеризується також активним застосуванням методів неруйнівного контролю (NDT) — ультразвукових, термографічних і

акустичних. Вони дозволяють здійснювати моніторинг стану армованих елементів у реальному часі та прогнозувати їхню довговічність [38, 39].

Таким чином, міжнародний досвід переконливо демонструє, що використання композитної арматури вийшло за межі експериментальних випробувань і стало повноцінною складовою сучасної інженерної практики. Класичні рішення (GFRP, BFRP, CFRP) вже успішно застосовуються у США, Канаді, Європі та Японії, тоді як новітні інновації (текстильний бетон, SDC, термопластичні FRP, гібридні стрижні) відкривають перспективи розширення сфер використання. Це підтверджує високий науковий та практичний потенціал композитних матеріалів, які дедалі частіше розглядаються як повноцінна альтернатива сталі в умовах сучасних вимог до довговічності та експлуатаційної ефективності будівельних конструкцій.

1.2.2 Механічні властивості та довговічність FRP

Механічні властивості композитної арматури істотно відрізняються від характеристик традиційної сталевोї, що зумовлює як потенційні переваги, так і певні обмеження у сфері її практичного застосування. У науковій літературі найбільша увага приділяється параметрам міцності на розтяг, модулю пружності та граничним деформаціям, оскільки саме ці показники визначають несучу здатність і деформаційні властивості бетонних елементів, армованих полімерними композитами [1, 40].

Результати численних досліджень підтверджують, що арматурні стрижні з волокнистих полімерів характеризуються високою міцністю на розтяг, яка у більшості випадків перевищує аналогічні показники сталі. Для склопластикових та базальтопластикових стрижнів значення міцності сягають рівнів, що майже удвічі перевищують межу текучості традиційної сталевої арматури. Вуглепластикові стрижні демонструють ще вищі показники, наближаючись до характеристик високоміцних конструкційних сталей. Таким

чином, за критерієм розрахункової міцності композитні матеріали не поступаються сталі, а в окремих випадках навіть перевершують її [41, 42, 43].

Разом із тим модуль пружності композитної арматури, як правило, є суттєво нижчим порівняно зі сталлю. Якщо для сталевих стрижнів цей показник становить близько 200 ГПа, то для склопластикових матеріалів він перебуває у діапазоні 40–70 ГПа, а для базальтопластикових — близько 50–70 ГПа. Лише вуглепластикові та гібридні стрижні демонструють підвищену жорсткість, яка в окремих випадках сягає 120–140 ГПа, що наближає їхні характеристики до сталевих аналогів. Знижений модуль пружності означає, що елементи, армовані FRP, за однакових навантажень можуть зазнавати більших прогинів та ширших розкриттів тріщин, ніж конструкції зі сталевим армуванням. Унаслідок цього в проєктній практиці виникає потреба у застосуванні спеціальних підходів до перевірки граничних станів та урахування зазначених особливостей при розрахунках [44, 45].

Ще однією характерною властивістю композитної арматури є крихкий характер руйнування (рис. 1.1). На відміну від сталі, яка характеризується наявністю стадії пластичних деформацій та здатністю завчасно сигналізувати про втрату несучої здатності, полімерні композити руйнуються раптово після досягнення граничного навантаження. Це створює додаткові вимоги до забезпечення надійності та безпеки конструкцій і обумовлює необхідність використання підвищених коефіцієнтів надійності під час проєктування елементів із композитним армуванням [8, 46].

Граничні деформації композитних арматурних стрижнів зазвичай не перевищують 1,5–2,5%, тоді як для сталевих арматур цей показник становить 5–10%. Відповідно, полімерні композити поступаються сталі за енергопоглинаючою здатністю, що має критичне значення для сейсмостійких споруд та конструкцій, які працюють в умовах інтенсивних динамічних навантажень [36].

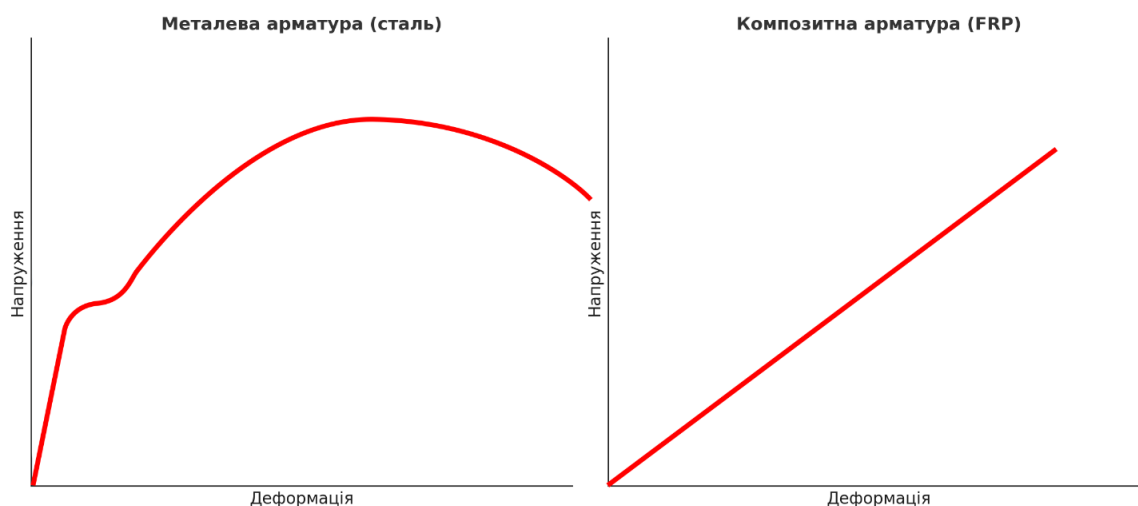


Рисунок 1.1 – Порівняння діаграм типового руйнування

Порівняльні експериментальні та чисельні дослідження підтверджують наявність суттєвих відмінностей у механічній поведінці різних типів полімерних композитів. Зокрема, арматурні стрижні на основі вуглецевих та гібридних волокон характеризуються підвищеною втомною міцністю, тоді як склопластикові матеріали виявляють більшу чутливість до багатократних циклічних навантажень. Водночас навіть у випадку найменш стійких різновидів полімерна арматура демонструє втомні характеристики, які перевищують мінімальні вимоги сучасних нормативних документів, що підтверджує можливість її застосування у відповідальних конструкціях [47, 48, 49].

Узагальнення отриманих результатів свідчить, що полімерні композити забезпечують високу початкову міцність, проте характеризуються зниженим модулем пружності та відсутністю стадії пластичних деформацій. Сукупність цих факторів обумовлює необхідність розроблення нових підходів до проектування та вдосконалення розрахункових моделей, які враховують специфіку роботи композитної арматури у складі бетонних конструкцій. Сучасні наукові дослідження, зокрема у напрямі створення гібридних матеріалів, орієнтовані на подолання вказаних обмежень і забезпечення більшої подібності механічної поведінки полімерних композитів до сталевій арматури [6, 50, 51].

1.2.3 Довговічність і вплив середовища

Довговічність композитної арматури є одним із ключових критеріїв оцінки ефективності армуючих матеріалів у будівельних конструкціях. Для сталевих арматур провідним механізмом деградації виступає корозія, тоді як полімерні композити позбавлені цього недоліку. Проте специфіка їхнього складу обумовлює інші механізми старіння, зокрема вплив вологи, температури та агресивних хімічних середовищ на полімерну матрицю та інтерфейс «волокно–матриця». Саме тому дослідження довговічності полімерних армуючих матеріалів протягом останніх десятиліть стали пріоритетним напрямом у галузі будівельного матеріалознавства [9, 10].

Експериментальні дослідження свідчать, що склопластикова арматура характеризується низьким рівнем водопоглинання (0,2–0,5%), що не призводить до суттєвого зниження механічних характеристик навіть після тривалого перебування у водному середовищі. Польові випробування транспортних споруд у США та Канаді підтвердили, що після понад 15 років експлуатації втрата міцності склопластикових стрижнів не перевищує 2–5%. Це свідчить про їхню практично повну інертність до вологи в умовах помірного й холодного клімату. Важливо, що FRP добре витримують багаторазові цикли заморожування–відтавання: численні експерименти показали збереження початкових властивостей навіть після сотень циклів, тоді як сталеві арматури у таких умовах зазнає істотного руйнування внаслідок корозійних процесів [12, 52, 53].

На відміну від сталі, яка демонструє високу стабільність у середовищі з підвищеним рівнем рН, композитна арматура може бути чутливою до дії лужних розчинів, що пов'язано з поступовим руйнуванням полімерної матриці під дією іонів гідроксилу. Разом із тим, сучасні смоли та вдосконалені технології виробництва істотно зменшують ці негативні ефекти. Відповідно до вимог стандартів CSA та ACI, збереження міцності після тривалих випробувань

у лужному середовищі має становити не менше 80%. Для більшості сучасних матеріалів цей показник перебуває на рівні 85–95%, що підтверджує їхню високу придатність для використання у бетоні [54, 55, 56, 57].

Особливого значення набуває стійкість FRP у прибережних і транспортних спорудах, де традиційна сталева арматура інтенсивно руйнується під дією хлоридів. Для композитних матеріалів цей чинник практично не впливає на експлуатаційні характеристики. Дослідження у морських умовах показали, що навіть після тривалого занурення композитні стрижні зберігають понад 90% початкової міцності. Це стало підставою для активного впровадження FRP у гідротехнічних спорудах країн із розвиненим портовим господарством (Японія, Норвегія, Канада) [58, 59, 60, 61].

Незважаючи на високу стійкість до вологи та агресивних реагентів, полімерна арматура залишається вразливою до підвищених температур. У більшості випадків органічна матриця зазнає термодеструкції при температурах понад 250–300 °C, що призводить до втрати цілісності та різкого зниження несучої здатності. Вуглепластикова арматура демонструє кращі показники термостійкості, однак її широке застосування обмежене високою собівартістю. Це зумовлює актуальність досліджень, спрямованих на створення нових термостійких смол і гібридних композитів [62].

Деградація механічних властивостей скловолоконної арматури при нагріванні є ступінчастою і тісно пов'язана з температурою склування T_g полімерної матриці. У діапазоні нижче T_g полімер перебуває у склоподібному стані, зберігаючи пружні властивості та здатність до передачі дотичних напружень між волокнами. При досягненні температури склування матриця переходить у гумоподібний стан, що супроводжується різким зниженням модуля зсуву G та погіршенням міжфазної взаємодії на границі волокно–матриця. Подальше підвищення температури призводить до початку термодеструкції і, зрештою, до карбонізації органічної складової. Саме тому підвищення T_g матриці є ключовим напрямом розробки термостійких GFRP-систем: бензоксазинові матриці з $T_g = 180\text{--}230$ °C забезпечують суттєво вищу

вогнестійкість порівняно зі стандартними епоксидними ($T_g = 120\text{--}160\text{ }^{\circ}\text{C}$) та вінілестерними ($T_g = 120\text{--}150\text{ }^{\circ}\text{C}$) системами [62, 77].

Окремої уваги заслуговує роль захисного бетонного шару у забезпеченні вогнестійкості залізобетонних конструкцій з композитним армуванням. Бетон має низьку теплопровідність ($0,8\text{--}1,4\text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$) і виконує функцію теплового бар'єра, суттєво сповільнюючи прогрів арматурного стрижня при пожежі. Дослідження показують, що збільшення товщини захисного шару з 20 до 40 мм дозволяє відтермінувати досягнення критичної температури в арматурі на 15–25 хвилин, що є суттєвим резервом вогнестійкості [75, 84]. Разом із тим відсутність уніфікованих нормативних вимог до мінімальної товщини захисного шару для GFRP-арматури в умовах пожежного навантаження залишається суттєвою прогалиною як у вітчизняних, так і в більшості міжнародних стандартів.

У промислових спорудах, де часто спостерігається дія кислот, лугів, палив і мастил, композитні матеріали завдяки своїй хімічній інертності демонструють високу стабільність. Особливо ефективними виявилися вугле- та базальтопластикові стрижні, які зберігають міцність навіть після тривалого контакту з агресивними реагентами, що робить їх перспективними для об'єктів хімічної промисловості та енергетики [13, 22, 63].

Найпереконливіші докази експлуатаційної надійності FRP отримані на основі довготривалих натурних спостережень. У рамках американської програми RE-CAST було проаналізовано низку мостових конструкцій, армованих композитними стрижнями, після 17 років експлуатації. Встановлено, що деградація властивостей була мінімальною та практично не впливала на несучу здатність. Аналогічні результати зафіксовані й у Канаді, де FRP застосовується у мостобудуванні понад два десятиліття [12, 64].

Таким чином, довговічність полімерної арматури підтверджується як лабораторними випробуваннями, так і багаторічними натурними дослідженнями. Висока стійкість до вологи, хлоридів та агресивних хімічних речовин, а також здатність витримувати цикли заморожування–відтавання

роблять FRP ефективною альтернативою сталі у більшості експлуатаційних умов. Основним обмеженням залишається низька термостійкість, що обумовлює необхідність вдосконалення матричних систем, розробки гібридних композитів та створення науково обґрунтованих моделей прогнозування довговічності бетонних конструкцій протягом усього життєвого циклу [9, 65].

1.2.4 Сумісність з бетоном

Ефективність бетонних конструкцій з армуванням значною мірою визначається не лише міцністю та довговічністю самого армуючого матеріалу, але й його здатністю до сумісної роботи з цементною матрицею. Для сталевій арматури така сумісність забезпечується комплексом чинників: механічним зчепленням, хімічною адгезією та близькістю коефіцієнтів теплового розширення сталі й бетону. Завдяки цьому забезпечується стабільність експлуатаційних характеристик і висока надійність конструкцій [66, 67].

У випадку композитних армуючих матеріалів, зокрема склопластикових та базальтопластикових стрижнів, проблема сумісності з цементною матрицею має специфічний характер і залишається одним із провідних напрямів досліджень у галузі матеріалознавства. Відмінності у фізико-хімічних властивостях, а також особливості мікроструктури полімерної матриці та інтерфейсу «волокно–смола» визначають інші механізми взаємодії з бетоном, порівняно з традиційною сталлю [68, 69].

Одним із ключових чинників, що впливають на рівень адгезії та ефективність роботи композитної арматури в бетоні, є геометрія поверхні стрижнів. На відміну від сталевих елементів, які завдяки рифленню формують високий механічний опір вислизанню, гладкі композитні стрижні демонструють знижені показники зчеплення. Для компенсації цього недоліку застосовуються спеціальні технологічні рішення: формування спіралеподібного профілю у процесі пултрузії, нанесення кварцового піску або

абразивних частинок на поверхню, інтеграція полімерних ребер чи інших профілювальних елементів (рис. 2) [14, 70, 71].

Результати експериментальних досліджень підтверджують, що використання таких технологічних підходів дозволяє суттєво підвищити міцність зчеплення композитної арматури з бетоном, наближаючи її значення до показників сталевих аналогів. Таким чином, удосконалення поверхневої структури композитних стрижнів розглядається як один із найперспективніших напрямів підвищення їхньої ефективності у складі залізобетонних конструкцій [72, 73].

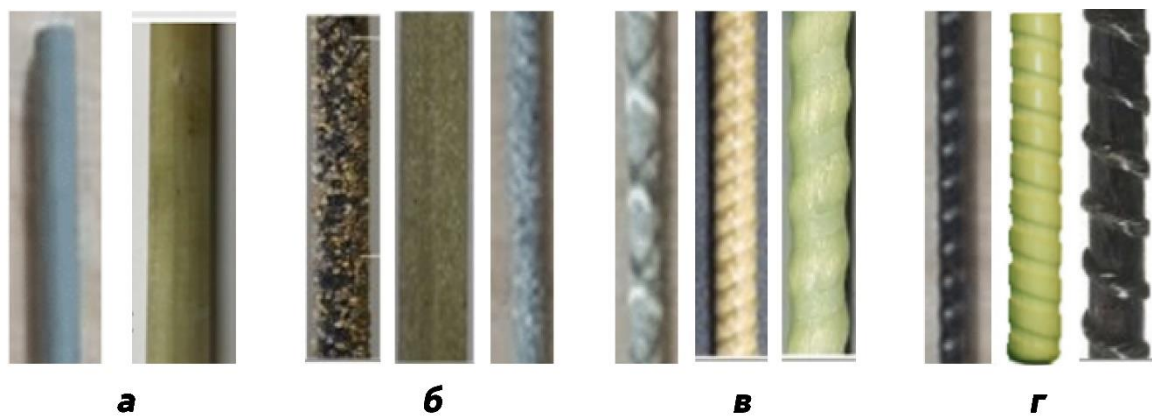


Рисунок 1.2 – Різні типи поверхні арматури: а) гладкі, б) з пісчаним покриттям, в) плетені, г) ребристі

Другим важливим чинником, що визначає ефективність спільної роботи арматури з бетонною матрицею, є теплове розширення. Для сталі коефіцієнт лінійного теплового розширення становить близько $12 \times 10^{-6} \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$, що практично відповідає аналогічному показнику бетону, забезпечуючи їхню сумісність у широкому діапазоні температурних режимів. У випадку композитних матеріалів цей параметр варіює у межах $6\text{--}26 \times 10^{-6} \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$ залежно від типу армуючого волокна та складу полімерної матриці. Для склопластикової (GFRP) та базальтопластикової (BFRP) арматури можливі значні відмінності у коефіцієнтах теплового розширення, що при різких температурних коливаннях може спричиняти виникнення додаткових внутрішніх напружень у бетоні.

Натомість вуглепластикова (CFRP) та гібридна арматура характеризуються коефіцієнтами, наближеними до показників бетону, що забезпечує підвищену довготривалу сумісність та стабільність експлуатаційних властивостей [67].

Адгезія композитної арматури до цементного каменю має комплексний характер і визначається поєднанням механічних та хімічних чинників. Механічний опір вислизанню формується завдяки рифленню, спіралеподібному профілю або спеціальним покриттям поверхні, тоді як хімічна взаємодія полімерної смоли з цементною матрицею є обмеженою. Це відрізняє композити від сталевих стрижнів, де корозійні процеси, хоч і мають руйнівний характер, на початкових етапах можуть тимчасово підвищувати адгезію через утворення продуктів корозії. Для FRP такого ефекту не спостерігається, і визначальним чинником сумісності стає геометрія та обробка поверхні [68, 74].

Сумісність визначається також поведінкою матеріалів під дією циклічних навантажень. Відомо, що при багаторазових навантаженнях відбувається поступове зниження міцності зчеплення, однак у більшості сучасних FRP-стрижнів цей процес залишається у допустимих межах. Лабораторні та натурні дослідження підтверджують, що бетонні елементи з композитним армуванням здатні працювати стабільно упродовж тривалих циклів навантаження, причому руйнування зазвичай ініціюється у бетонній матриці, а не на межі зчеплення «бетон–арматура» [66, 74].

Окремо слід відзначити довговічність зчеплення в умовах вологих та агресивних середовищ. На відміну від сталі, яка втрачає адгезію внаслідок корозійних процесів, FRP-стрижні зберігають первинні властивості навіть за умов тривалого контакту з вологою чи агресивними хімічними реагентами. Польові дослідження мостових конструкцій у США та Канаді засвідчили, що після понад 15 років експлуатації не було виявлено істотного зниження адгезії композитної арматури до бетону [53, 74].

Таким чином, сумісність композитної арматури з бетонною матрицею визначається передусім коефіцієнтом теплового розширення та технологічними

особливостями поверхневої структури. Незважаючи на відмінності від сталі, сучасні технології виробництва забезпечують високий рівень зчеплення та довготривалу стабільність спільної роботи з бетоном. Це робить полімерні композити перспективними для використання у відповідальних бетонних конструкціях, де критичними є довговічність, стійкість до агресивних факторів середовища та надійність експлуатації [67, 68].

1.2.5 Вплив температури на арматурні матеріали

Температурний фактор є одним із ключових чинників, що визначають довговічність та експлуатаційну безпеку армованих бетонних конструкцій. Якщо в умовах стандартної експлуатації основними загрозами для арматури виступають вологість і корозійні процеси, то під час пожеж або високотемпературних технологічних впливів саме термостійкість матеріалів визначає збереження несучої здатності конструктивних елементів. У цьому контексті простежуються суттєві відмінності між поведінкою сталевोї та полімерної композитної арматури [75].

Сталеві арматурні стрижні при підвищенні температури демонструють поступове зниження міцності та жорсткості. Вже при 300 °C межа текучості зменшується на 10–20%, а за температури 500–600 °C спостерігається різке падіння несучої здатності. Водночас сталь зберігає здатність до пластичних деформацій навіть у нагрітому стані, що забезпечує певний запас безпеки та дозволяє конструкції «сигналізувати» про наближення критичного стану. Саме ця особливість зумовила тривале домінування сталі як основного армуючого матеріалу в будівництві, особливо у спорудах із підвищеними вимогами до пожежної безпеки [75].

Композитна арматура на основі полімерних матриць (FRP) характеризується принципово іншою поведінкою під дією високих температур. Найбільш вразливою складовою є полімерна матриця, яка за температур 250–300 °C зазнає термодеструкції. Це спричиняє руйнування міжфазних зв'язків та

втрату структурної цілісності композиту, внаслідок чого різко знижується його несуча здатність. Руйнування має крихкий, раптовий характер без стадії пластичних деформацій, що створює додаткові ризики під час пожеж [62, 76].

Експериментальні дослідження засвідчили, що склопластикові та базальтопластикові стрижні є найбільш чутливими до температурних впливів: після короточасного нагрівання понад 300 °C вони практично повністю втрачають здатність працювати на розтяг. Вуглепластикова арматура (CFRP) демонструє вищу термостійкість, зберігаючи залишкову міцність до 400–450 °C, проте її широке застосування обмежується високою собівартістю. Перспективним напрямом вважається створення гібридних композитів, у яких поєднання різних типів волокон та термостійких смол забезпечує підвищену ефективність роботи матеріалу за умов пожежного навантаження [77, 78, 79, 80, 81].

Важливим критерієм сумісності арматурних матеріалів із цементною матрицею є коефіцієнт теплового розширення. Для сталі цей показник близький до коефіцієнта бетону, що забезпечує стабільність контактної зони при нагріванні. Для композитів коефіцієнт варіює в межах $6\text{--}26 \times 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ та залежить від орієнтації волокон, що може зумовлювати появу додаткових внутрішніх напружень на межі «арматура–бетон» у разі різких температурних коливань [67].

Циклічне температурне навантаження є ще одним важливим аспектом експлуатації. Для сталевих арматур повторні цикли нагрівання та охолодження можуть призводити до утворення мікротріщин або локального зміцнення, але несуча здатність при цьому зберігається. Для композитної арматури такі цикли є значно критичнішими, оскільки викликають деградацію полімерної матриці та порушення міжфазної адгезії на межі «волокно–матриця». Це обумовлює необхідність проведення спеціалізованих експериментальних досліджень для прогнозування довговічності матеріалів у пожежонебезпечних умовах [82, 83].

Сучасні науково-практичні завдання у цій сфері зосереджуються на підвищенні вогнестійкості композитної арматури. Серед перспективних

підходів – застосування термостійких полімерних смол, нанесення вогнезахисних покриттів, збільшення товщини бетонного захисного шару, а також використання концепції гібридного армування, що поєднує корозійну стійкість FRP з термостійкістю сталі. Такий підхід забезпечує вищий рівень надійності конструкцій у складних умовах експлуатації [80, 84].

Таким чином, проведений аналіз свідчить, що сталева арматура наразі зберігає переваги у випадках пожежної небезпеки, тоді як полімерні композити, попри їхні численні переваги, характеризуються обмеженою термостійкістю. Це суттєво звужує сферу їх використання в об'єктах, для яких критичною вимогою є забезпечення вогнестійкості. Подальші дослідження мають бути спрямовані на вдосконалення складу полімерних матриць, створення нових термостійких композитів і розроблення конструктивних рішень, що дозволять мінімізувати ризики втрати несучої здатності в умовах пожежі [62, 75].

1.2.6 Стан нормативної бази

Нормативно-правова база є визначальним чинником у процесі впровадження нових матеріалів у будівельну практику. Для сталевих арматур протягом десятиліть сформовано розгалужену систему стандартів і норм, що регламентують її виробництво, властивості, методи випробувань і проєктні розрахунки. Для композитних матеріалів така база наразі перебуває у процесі становлення і характеризується фрагментарністю. Існуючі документи в різних країнах демонструють відмінності у методиках випробувань, критеріях оцінки довговічності та врахуванні специфічних експлуатаційних чинників, зокрема впливу підвищених температур [85, 86, 87].

Канада вважається одним із піонерів у нормативному забезпеченні застосування полімерних композитів. Ще у 1990-х роках були прийняті стандарти CSA S806 “Design and Construction of Building Components with Fibre-Reinforced Polymers” та CSA S807 “Specification for Fibre-Reinforced Polymers”. Перший документ регламентує проєктування бетонних конструкцій із

композитним армуванням, другий – встановлює вимоги до складу, властивостей, методів випробувань та маркування арматури. У цих стандартах приділено увагу довговічності композитних стрижнів в агресивних середовищах, а також врахуванню температурного чинника, зокрема склувальної температури полімерної матриці та її деградації при пожежному впливі [16, 17].

У США основним документом є ACI 440 “Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars”. Він містить систематизовані положення щодо проєктування та експлуатації бетонних конструкцій із FRP-армуванням, визначає особливості їхньої механічної поведінки та довговічності. Проте питання термостійкості у цьому документі розглянуто лише побіжно: зазначається чутливість композитної арматури до високих температур, але відсутні чіткі методики випробувань та нормативні критерії вогнестійкості. Це змушує проєктантів орієнтуватися на загальні вимоги пожежної безпеки для залізобетону з урахуванням додаткових коефіцієнтів надійності [8, 19].

Європейська практика розвивається на основі рекомендацій Fédération Internationale du Béton (fib), зокрема fib Model Code. Ці документи містять узагальнені положення щодо використання FRP у залізобетонних конструкціях, включаючи оцінку міцності, жорсткості, адгезії та довговічності. Проте вплив високих температур у цих нормах розкритий недостатньо. Переважна більшість європейських публікацій акцентує на доцільності додаткового захисту FRP за допомогою бетонного шару чи спеціальних покриттів, але єдиної методики визначення вогнестійкості наразі не існує [20, 21].

В Україні формування нормативної бази перебуває на початковому етапі. У 2021 році було ухвалено ДСТУ 9065:2021 “Арматура композитна для армування бетонних конструкцій. Загальні технічні умови”, який визначає основні вимоги до складу та характеристик арматури. Того ж року введено ДСТУ ISO 10406-1:2021, що регламентує методи випробування композитних стрижнів на міцність і довговічність. Водночас обидва документи не містять

положень щодо оцінки термостійкості та поведінки FRP у випадках пожежного навантаження [88, 89, 90, 91].

Узагальнення міжнародного та національного досвіду дозволяє виокремити низку ключових проблем:

- відсутність уніфікованих стандартів, що ускладнює гармонізацію вимог і порівняння результатів;
- недостатнє врахування температурних впливів та відсутність регламентованих методик випробувань на вогнестійкість;
- фрагментарність національної нормативної бази в Україні, орієнтованої переважно на механічні характеристики та довговічність у вологому чи хімічному середовищі;
- обмеженість довготривалих натурних даних експлуатації, необхідних для створення надійних критеріїв проєктування.

Таким чином, сучасна нормативна база для застосування FRP перебуває у процесі розвитку. Найбільш комплексні стандарти розроблені у Канаді та США, проте навіть вони не охоплюють повною мірою аспекти термостійкості. Європейський підхід орієнтований на інтеграцію FRP у загальні проєктні документи (fib Model Code), проте відсутність єдиної системи вогнестійкісних випробувань залишається актуальною проблемою. В Україні нормативне забезпечення лише формується та потребує розширення із включенням положень, що регламентують поведінку композитної арматури за умов високотемпературних впливів. Подальший розвиток цієї сфери має бути спрямований на гармонізацію національних стандартів із міжнародними та на обов'язкове врахування температурного чинника як одного з ключових у забезпеченні довговічності та надійності бетонних конструкцій. безпечної експлуатації композитних арматур у будівельних конструкціях [8, 16, 20, 90].

1.2.7 Узагальнення та невирішені проблеми

Аналіз сучасних наукових публікацій і нормативних документів свідчить про суттєвий прогрес у вивченні властивостей полімерних композитів та можливостей їхнього використання у будівельних конструкціях. Арматура на основі волокнистих полімерів (FRP) зарекомендувала себе як ефективна альтернатива сталі, особливо у випадках, коли визначальним чинником є корозійна стійкість і довговічність. Позитивний досвід експлуатації таких матеріалів накопичено у країнах Північної Америки, Європи та Азії, зокрема у мостових спорудах, гідротехнічних об'єктах і транспортній інфраструктурі, що підтверджує їх високу ефективність у складних експлуатаційних умовах [1, 2, 92].

До ключових переваг FRP у порівнянні зі сталлю належать:

- висока міцність на розтяг;
- інертність до корозійних процесів у вологих та агресивних середовищах;
- низька густина, що забезпечує зменшення маси конструкцій і спрощує транспортування;
- стабільність механічних характеристик протягом тривалої експлуатації.

Разом з тим, огляд літератури засвідчив наявність низки проблемних аспектів, які стримують широке впровадження композитної арматури. Одним із них є нижчий модуль пружності. Для склопластикових і базальтопластикових стрижнів цей показник становить лише 40–70 ГПа, що у 2–3 рази менше від сталевих аналогів (≈ 200 ГПа). Це призводить до збільшення прогинів та розкриття тріщин у бетонних елементах, ускладнюючи проектування. Частково проблему вирішують вуглепластикові та гібридні композити, однак їх висока собівартість обмежує можливість масового застосування [43, 44, 45].

Другим суттєвим обмеженням є крихкий характер руйнування. На відміну від сталі, яка зберігає пластичність і здатність попереджати про досягнення граничного стану, FRP руйнується раптово після перевищення межі

міцності. Це знижує рівень конструктивної надійності та вимагає застосування підвищених коефіцієнтів безпеки при проектуванні [46].

Високотемпературні впливи залишаються одним із найбільш критичних факторів. Сталева арматура зберігає працездатність до температури 500–600 °C, тоді як полімерні композити втрачають несучу здатність уже при 250–300 °C унаслідок термодеструкції матриці. Характер руйнування при цьому є крихким і миттєвим, що створює додаткові ризики у разі пожежі. CFRP має вищу термостійкість (до 400–450 °C), однак його широке впровадження обмежене високою вартістю. При цьому відсутність уніфікованих методик випробувань на вогнестійкість суттєво ускладнює прогнозування поведінки композитної арматури у пожежних сценаріях [62, 75, 84].

Ще одним важливим аспектом є сумісність із цементною матрицею. Хоча сучасні технології поверхневого рифлення та нанесення абразивних покриттів значно підвищують механічне зчеплення FRP із бетоном, відсутність хімічної взаємодії, властивої сталі, зумовлює необхідність у проведенні додаткових експериментів і тривалих натурних досліджень [67, 68].

Окремою проблемою залишається нормативна невизначеність. Існує кілька систем стандартів (CSA, ACI, fib, ISO), які застосовують різні підходи до випробувань і проектування, що ускладнює гармонізацію вимог. В Україні нормативна база перебуває на початковому етапі розвитку: чинні стандарти регламентують лише базові технічні характеристики FRP і методи випробувань, проте не враховують термостійкість і специфіку роботи у пожежних умовах [8, 16, 20, 40].

Крім того, бракує довготривалих експлуатаційних даних. У Канаді та США підтверджено стабільність властивостей FRP протягом 15–20 років експлуатації, тоді як для України та інших країн із подібними кліматичними умовами відсутні масштабні натурні спостереження [12, 64, 93].

Таким чином, сучасний рівень досліджень свідчить, що композитні арматури є перспективним матеріалом для підвищення довговічності та надійності бетонних конструкцій, проте їх масове застосування потребує

вирішення низки науково-технічних завдань. Подальші дослідження мають бути спрямовані на: підвищення жорсткості та енергопоглинальної здатності FRP; створення термостійких полімерних матриць і гібридних матеріалів; вдосконалення методів підвищення адгезії з бетоном; гармонізацію міжнародних та національних нормативів; накопичення довготривалих результатів експлуатаційних досліджень у різних кліматичних умовах [65, 94].

Узагальнюючи, можна констатувати, що композитна арматура має значний потенціал як конструкційний матеріал нового покоління, проте її широке впровадження у практику будівництва можливе лише за умови вдосконалення нормативної бази та подолання існуючих науково-технічних обмежень [1].

1.3 Постановка наукових завдань

Аналіз літературних джерел, виконаний у попередніх підрозділах, дозволив встановити, що скловолоконна (GFRP) арматура є перспективною альтернативою традиційній сталевій завдяки високій корозійній стійкості, малій питомій вазі та достатній міцності на розтяг. Разом з тим поведінка скловолоконної арматури в умовах термомеханічного навантаження, зокрема при пожежі, залишається недостатньо вивченою. Відсутні кількісні дані щодо зв'язку між параметрами структуроутворення міжфазних границь волокно–матриця та ефективними пружними і теплофізичними константами композиту в широкому діапазоні температур. Також бракує систематизованих порівняльних даних про зміну мікроструктури та механічних властивостей сталевих і скловолоконних арматур після термічного впливу. Зазначені прогалини стримують розвиток нормативної бази та широке впровадження GFRP-армування у конструкції підвищеної вогнестійкості.

З огляду на викладене, метою дисертаційної роботи є наукове обґрунтування та формування експериментально-теоретичних засад

застосування композитної скловолоконної арматури у залізобетонних будівельних конструкціях за умов механічного та термічного навантаження.

Для досягнення поставленої мети вирішуються такі завдання дослідження:

1. Провести порівняльний аналіз мікроструктури та хімічного складу міжфазних границь сталеві арматури класу A500C і композитної скловолоконної арматури у вихідному стані методами металографічного аналізу, скануючої електронної мікроскопії та EDX-аналізу.
2. Дослідити вплив температурного навантаження на фазові перетворення структурного складу сталеві та скловолоконної арматури.
3. Визначити методом чисельного моделювання основні константи для дев'яти комбінацій скловолокно–матриця при об'ємному вмісті волокон 10–70% та температурах 20–230 °C, а також встановити раціональний діапазон об'ємного вмісту за критерієм термомеханічної сумісності скловолоконної арматури з бетонною матрицею.
4. Методом скінчених елементів виконати моделювання температурного поля та термомеханічної поведінки залізобетонних конструкцій із сталеві та скловолоконною арматурою при нагріванні з визначенням критичних температурних меж деградації несучої здатності та оцінкою захисної функції бетонного шару.
5. Провести експериментальні випробування на стиск зразків бетону класу B30 зі сталеві та скловолоконною арматурою, встановити вплив типу несучої арматури на комплекс механічних характеристик та характер армування на несучу здатність та характер руйнування армування поверхонь конструктивних елементів.

Висновки до Розділу 1

У першому розділі дисертаційної роботи на основі критичного аналізу наукових публікацій, міжнародних та вітчизняних нормативних документів

систематизовано сучасний стан досліджень у галузі застосування сталевий та композитної арматури в залізобетонних конструкціях. За результатами огляду встановлено:

1. Сталева арматура класу A500C залишається домінуючим армуючим матеріалом у масовому будівництві завдяки перевірній технології термомеханічного зміцнення, що формує характерну тризонну будову поперечного перерізу (мартенсит – бейніт – ферито-бейнітна суміш), комплексу нормованих механічних властивостей та сумісності з бетоном за коефіцієнтом теплового розширення. Разом з тим вразливість сталі до корозії у вологих та агресивних середовищах суттєво скорочує термін служби конструкцій.

2. Скловолоконна (GFRP) арматура є найбільш поширеним видом композитного армування завдяки оптимальному поєднанню корозійної стійкості, малої питомої ваги та високої міцності на розтяг. Позитивний досвід її тривалої експлуатації підтверджено у країнах Північної Америки, Європи та Азії — переважно у мостах, гідротехнічних спорудах і конструкціях у хімічно агресивних середовищах.

3. До ключових обмежень скловолоконної арматури належать: нижчий за сталевий модуль пружності (40–60 ГПа проти 200 ГПа), що зумовлює збільшені прогини; крихкий характер руйнування без пластичної стадії; чутливість полімерної матриці до підвищених температур — при досягненні температури склування $T_g \approx 120\text{--}150\text{ }^{\circ}\text{C}$ починається розм'якшення матриці, а при 250–300 $^{\circ}\text{C}$ відбувається повна термодеструкція з різкою втратою несучої здатності, тоді як сталь зберігає працездатність до 500–600 $^{\circ}\text{C}$.

4. Вирішальну роль у формуванні механічних та теплофізичних властивостей композитної арматури відіграють міжфазні границі волокно–матриця. Характер адгезії, локальні дефекти на цих границях та їх поведінка при термічному навантаженні суттєво впливають на ефективну передачу напружень у матеріалі і є одним із найменш вивчених аспектів у контексті термомеханічного навантаження.

5. Коефіцієнт теплового розширення GFRP-арматури суттєво залежить від типу волокна, типу матриці та об'ємної частки волокна і може значно відрізнятися від відповідного показника бетонної матриці, що зумовлює виникнення додаткових термічних напружень на межі арматура–бетон при нагріванні. Раціональний вибір об'ємної частки волокна за критерієм термомеханічної сумісності потребує кількісного обґрунтування.

6. Аналіз нормативної бази показав, що найбільш розвинені стандарти щодо проєктування з GFRP-армуванням розроблено у Канаді (CSA S806, S807) та США (ACI 440). В Україні діють лише базові документи (ДСТУ 9065:2021, ДСТУ ISO 10406-1:2021), які регламентують загальні технічні умови, однак не містять вимог щодо термостійкості та поведінки при пожежі.

Узагальнення результатів аналізу літератури засвідчило, що залишаються недостатньо вивченими: кількісний зв'язок між параметрами структуроутворення міжфазних границь волокно–матриця та ефективними інженерними константами GFRP-арматури в широкому діапазоні температур; механізми деградації міжфазних зон після термічного впливу та їх вплив на механічні властивості залізобетонних конструкцій у порівнянні зі сталлю A500C.

РОЗДІЛ 2

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

У розділі обгрунтовано вибір об'єктів дослідження, наведено відомості про склад, мікроструктуру, технологію виготовлення та основні властивості сталевий і скловолоконної арматури, описано методики приготування бетонної суміші, виготовлення дослідних зразків, проведення механічних та теплових випробувань, а також методики структурного аналізу та чисельного моделювання. Усі застосовані методи відповідають вимогам чинних нормативних документів та забезпечують достовірність і відтворюваність отриманих результатів.

2.1 Обгрунтування вибору об'єктів дослідження

Вибір об'єктів дослідження визначався необхідністю порівняльного аналізу поведінки металевої та полімерної композитної арматури у залізобетонних конструкціях при дії як статичного механічного, так і термомеханічного навантаження. Проведений аналіз сучасного стану досліджень у галузі армованого бетону показав, що незважаючи на значний обсяг публікацій щодо окремих властивостей скловолоконної арматури, систематичне порівняння двох типів армування із застосуванням комплексу сучасних методів мікроструктурного та чисельного аналізу залишається актуальним науковим завданням.

Дослідження виконано на двох типах арматурних стержнів діаметром 14 мм, що є найбільш поширеним діаметром для конструктивного армування: термічно зміцнена сталева арматура класу A500C та скловолоконна (GFRP) арматура. Вибір саме цього діаметра обумовлений широким застосуванням у несучих залізобетонних конструкціях, де він забезпечує оптимальне співвідношення між несучою здатністю та технологічністю укладання.

Сталева арматура класу A500C відповідає вимогам ДСТУ 3760:2019[85] і є найбільш вживаним типом робочої арматури у вітчизняному будівництві. Стандарт регламентує хімічний склад, механічні властивості (межа плинності, тимчасовий опір, відносне подовження), геометрію ребристого профілю та вимоги до зварюваності. Арматура класу A500C виробляється методом термомеханічного зміцнення (ТМТ-процес), що формує характерну багат шарову мікроструктуру перерізу з підвищеними міцнісними показниками при збереженні достатньої пластичності. Дослідні стержні виготовлено на металургійному комбінаті «Криворіжсталь» у потоці дрібносортового прокатного стану.

Скловолоконна арматура обрана як перспективна альтернатива сталевій завдяки комплексу переваг: питома міцність на розтяг у 2-3 рази вища, ніж у сталі; повна корозійна стійкість у лужному середовищі бетону та агресивних середовищах; електромагнітна прозорість; значно менша теплопровідність. Разом із тим, GFRP-арматура має нижчий модуль пружності та суттєво знижені характеристики при температурах вище температури склування матриці T_g , що вимагає детального вивчення поведінки в умовах пожежі.

Для чисельного моделювання ефективних властивостей GFRP-арматури в середовищі ANSYS Material Designer розглянуто дев'ять комбінацій компонентів: три типи армувальних скловолокон (E-glass, AR-glass, S-glass) у поєднанні з трьома полімерними матрицями (епоксидна, вінілестерна, бензоксазинова). Такий набір охоплює практично весь діапазон матеріалів, що застосовуються у виробництві GFRP-арматури для будівельних конструкцій, і дозволяє системно оцінити вплив типу компонентів на ефективні механічні та теплофізичні характеристики.

2.2 Металева арматура: склад, структура та технологія виготовлення

Термічно зміцнена арматура класу A500C виробляється методом гарячого прокатування з подальшим термомеханічним зміцненням у потоці прокатного

стану. Після виходу з останньої прокатної кліті стержень проходить через водоохолоджувальну установку, в якій поверхневі шари охолоджуються зі швидкістю, що перевищує критичну швидкість гартування, тоді як серцевина залишається гарячою. У подальшому відбувається самовідпуск поверхневих шарів за рахунок теплового потоку із серцевини. Такий режим термічного впливу формує характерний радіальний градієнт мікроструктури по перерізу стержня.

Результатом процесу є п'ять структурно неоднорідних концентричних зон у поперечному перерізі стержня, позначених шарами А-Д. Зовнішній шар А (мартенсит та мартенсит відпуску) формується внаслідок найбільшої швидкості охолодження на поверхні; шар Б являє собою верхній бейніт із залишками фериту; шар В є перехідним із вмістом до 10 % перліту; шар Г становить нижній бейніт; центральна область Д (ферито-бейнітна серцевина) формується в умовах найповільнішого охолодження. Товщина кожного шару залежить від діаметра стержня та технологічних параметрів охолодження.

Макроструктура поперечного перерізу термічно зміцненої арматури А500С у стані поставки наведена на рисунку 2.1.



Рисунок 2.1 - Макроструктура поперечного перерізу арматурного стержня А500С у стані поставки з позначенням структурних зон А-Д

Хімічний склад та нормовані механічні властивості досліджуваної арматури А500С відповідно до ДСТУ 3760:2019[85] наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 - Хімічний склад і механічні властивості арматури А500С

Діаметр стержня, мм	Марка сталі	Вміст хімічних елементів, % ваг.					Механічні властивості		
		С	Mn	Si	S	P	σ_B МПа	σ_T , МПа	δ , %
14	Ст3сп	0,196	0,56	0,118	0,019	0,01	670	596	20,1

Профіль арматурного стрижня є ребристим (серповидним) із поперечними виступами, що забезпечують механічне зчеплення з бетоном. Параметри профілю (крок, висота та кут нахилу ребер) регламентовано ДСТУ 3760:2019[85]. Термомеханічне зміцнення дозволяє отримати підвищені значення межі плинності без додаткового легування, що знижує вартість матеріалу порівняно з термічно не зміцненими аналогами.

Основним фактором деградації металеві арматури під час пожежі є нагрівання понад температуру фазових перетворень, що призводить до аустенітизації сталі та подальшого формування рівноважної ферито-перлітної структури при повільному охолодженні. Внаслідок цього повністю втрачається ефект термомеханічного зміцнення, а механічні характеристики суттєво знижуються.

2.3 Скловолоконна арматура: склад, архітектура та технологія виготовлення

Скловолоконна (GFRP) арматура являє собою полімерний композиційний матеріал, що складається з армувальних скляних волокон, просочених і з'єднаних полімерною матрицею. Властивості такої арматури визначаються не лише складом компонентів, але й їх об'ємним співвідношенням, орієнтацією волокон та якістю міжфазної зони «волокно-матриця». У перерізі стрижня

виділяють центральну зону з волокнами, орієнтованими вздовж осі, та периферійну зону зі спіралью намотаними волокнами, що забезпечують адгезію до бетону. Вказана структура формується в процесі пултрузії.

Макроструктура поперечного перерізу скловолоконної арматури у стані поставки наведена на рисунку 2.2.

Для дослідження та чисельного моделювання обрано три типи армувальних скловолокон, хімічний склад яких наведено в таблиці 2.2.



Рисунок 2.2 - Макроструктура поперечного перерізу скловолоконної арматури у стані поставки: характер розподілу волокон та полімерної матриці

Таблиця 2.2 - Хімічний склад основних типів скловолокон, % мас.

Оксид	E-glass	AR-glass	S-glass
SiO ₂	52-56	61-66	64-66
Al ₂ O ₃	12-16	0-5	24-26
CaO	16-25	4-10	0-0,3
MgO	0-5	0-5	9-11
ZrO ₂	-	14-20	-
Na ₂ O+K ₂ O	0-2	2-5	0-0,2
Ef, ГПа	72-74	74-76	86-90
su, МПа	3400-3500	2000-3000	4400-4600
ρ, г/см ³	2,54-2,60	2,60-2,70	2,46-2,50

E-glass (електротехнічне скло) є найпоширенішим типом армувальних волокон у будівельній галузі завдяки оптимальному поєднанню міцності, електроізоляційних властивостей та технологічності виробництва. Проте E-glass має обмежену стійкість до впливу лужних розчинів, характерних для бетонного середовища.

AR-glass (alkali-resistant glass) спеціально модифіковано додаванням діоксиду цирконію (ZrO_2 у кількості 14-20 %), що формує на поверхні волокон захисний шар і суттєво підвищує стійкість до лужної корозії в бетоні. Завдяки цьому AR-glass є переважаючим вибором для GFRP-арматури, призначеної для тривалої експлуатації у залізобетоні.

S-glass (structural glass) характеризується підвищеним вмістом SiO_2 та Al_2O_3 за зниженої кількості лужних оксидів, що зумовлює найвищий серед трьох типів модуль пружності (86-90 ГПа) та межу міцності на розтяг (до 4600 МПа). Завдяки цьому S-glass застосовується там, де ключовою є жорсткість армувального елемента при обмежених габаритах перерізу.

Діаметр елементарних волокон становить 10-20 мкм; поверхня волокон покривається сайзингом - тонким функціональним покриттям на основі силанових сполук, що забезпечує адгезію до полімерної матриці, захищає волокна від механічних пошкоджень та вологи.

Полімерна матриця забезпечує зв'язність волокон, передачу дотичних напружень між ними та захист від зовнішнього середовища. Термостійкість матриці, що характеризується температурою склування T_g , є критичним параметром для поведінки GFRP-арматури в умовах підвищених температур. Основні властивості трьох обраних типів матриць наведено в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 - Основні властивості полімерних матриць

Матриця	T_g , °C	E, ГПа	σ_u , МПа	ρ , г/см ³
Епоксидна (EP)	120-160	3,5-4,5	60-85	1,20-1,25
Вінілестерна (VE)	120-150	3,2-4,0	70-80	1,15-1,20
Бензоксазинова (BZ)	180-230	3,8-4,8	70-90	1,18-1,22

Епоксидна матриця (EP) є найбільш вживаною у виробництві GFRP-арматури завдяки високій адгезії до скловолокна, низькій усадці при полімеризації та стабільним механічним властивостям при помірних температурах. Температура склування EP-матриць становить 120-160 °C.

Вінілестерна матриця (VE) характеризується підвищеною хімічною стійкістю та ударною в'язкістю порівняно з епоксидними системами. Tg вінілестерних матриць знаходиться в діапазоні 120-150 °C, що є недостатнім для застосувань з підвищеними вимогами до вогнестійкості.

Бензоксазинова матриця (BZ) є перспективною теплостійкою системою з Tg = 180-230 °C та близьким до нуля рівнем усадки при відверджуванні. BZ-матриці характеризуються також підвищеною стійкістю до зволоження та ультрафіолетового опромінення, що робить їх особливо привабливими для будівельних застосувань з підвищеними вимогами до довговічності.

Арматурні стрижні виготовляються методом пултрузії - безперервного протягування пучків попередньо просочених смолою волокон через нагрівну матрицю заданого профілю, де відбувається полімеризація. Стандартна швидкість пултрузії становить 0,5-1,5 м/хв; температура матриці залежить від типу смоли. Після виходу з формуючої матриці стержень охолоджується та нарізається на відрізки заданої довжини. Для забезпечення адгезії до бетону на поверхні стержня формується рельєф шляхом спірального намотування волокна або нанесення кварцового піску.

Для натурального дослідження було обрано скловолоконну арматуру виробництва BV FRP Manufacturing Inc. (Канада), діаметр стрижня 14 мм, плетеного профілю. Хімічний склад наведено в таблиці 2.4

Таблиця 2.4 - Хімічний склад скловолоконної арматури, % мас.

Структурна зона	C, %	O, %	Al, %	Si, %	Ca, %
Волокно	25,96	18,48	6,70	28,92	19,83
Матриця	77,49	18,86	3,65	-	-

2.4 Методики випробувань композитної скловолоконної арматури

З метою визначення комплексу фізико-механічних характеристик композитної скловолоконної арматури діаметром 12, 19 та 22 мм виробництва BV FRP Manufacturing Inc. (Канада) були проведені лабораторні випробування. Отримані результати слугують експериментальною базою для порівняльного аналізу механічних та експлуатаційних властивостей скловолоконної арматури зі сталевою арматурою класу A500C.

Визначення номінальної площі поперечного перерізу та номінального діаметра проводилося відповідно до п. 5 ДСТУ ISO 10406-1:2021[91]. Зразки завдовжки (100 ± 1) мм занурювали в мірний циліндр з деіонізованою водою і визначали об'єм витісненої рідини. Номінальну площу перерізу обчислювали діленням виміряного об'єму на довжину зразка, номінальний діаметр — за формулою еквівалентного кола.

Визначення властивостей під час розтягу виконувалося за п. 6 ДСТУ ISO 10406-1:2021[91] на зразках завдовжки (1000 ± 10) мм (5 шт. для кожного діаметра) із анкерним закріпленням кінців. Фіксувалися: максимальне зусилля при розриві, міцність на розтяг (МПа), модуль пружності (ГПа) — за допомогою екстензометра ИЧЦ 0–12,7 мм, а також гранична деформація (%).

Визначення лугостійкості здійснювалося за п. 11 ДСТУ ISO 10406-1:2021[91]. Зразки витримувались 30 діб у лужному розчині ($\text{pH} \geq 13$: 8,0 г NaOH + 22,4 г КОН на 1 л деіонізованої води) при температурі $(60 \pm 3)^\circ\text{C}$, після чого випробовувались на розтяг. Оцінювався коефіцієнт збереження міцності K як відношення міцності після витримки до початкової.

Визначення міцності на поперечний зріз проводилося за п. 13 ДСТУ ISO 10406-1:2021[91] на зразках завдовжки (300 ± 5) мм. Зразок встановлювали у спеціальний пристрій із двома площинами зрізу та навантажували до руйнування; міцність обчислювали як відношення максимального навантаження до подвоєної номінальної площі поперечного перерізу.

Визначення міцності зчеплення з бетоном виконувалося за п. 7 ДСТУ ISO 10406-1:2021[91]. Зразки-куби з бетону класу В30 (середня міцність на стиск 38,2 МПа після 28 діб тверднення) розмірами 100×100×100 мм для d=12 мм та 150×150×150 мм для d=19 і 22 мм із вмонтованим стрижнем випробовували методом висмикування; міцність зчеплення визначали як відношення зусилля висмикування до площі ділянки зчеплення (МПа).

Визначення тривалої релаксації під час розтягу здійснювалося за п. 9 ДСТУ ISO 10406-1:2021[91]. Зразки навантажували до 70 % від гарантованої міцності та витримували під постійним деформуванням; зниження зусилля вимірювалося через 1, 100 та 1000 годин і визначалась середня швидкість релаксації (%/год).

Визначення руйнування у разі повзучості виконувалося за п. 12 ДСТУ ISO 10406-1:2021[91]. Зразки навантажували на рівнях 50–90 % від гарантованої міцності та витримували до руйнування або до 1000 годин; за результатами будувались криві повзучості та визначався безпечний рівень тривалого навантаження.

Визначення втоми у разі розтягу проводилося за п. 10 ДСТУ ISO 10406-1:2021[91]. Зразки піддавались циклічному навантаженню з коефіцієнтом асиметрії $R=0,1$ на частоті 1 Гц при трьох рівнях амплітуди. Фіксувалась кількість циклів до руйнування для побудови кривої втомленості.

2.5 Методики випробувань металевої арматури класу A500C

Для отримання порівняльних даних щодо механічних властивостей та характеру взаємодії з бетоном сталеві арматури класу A500C діаметром 14 мм була досліджена за трьома видами випробувань: статичний розтяг, вимірювання мікротвердості та визначення міцності зчеплення з бетоном (відрив).

Випробування на статичний розтяг виконувалися відповідно до ДСТУ EN ISO 6892-1[101] на зразках повного перерізу стрижня завдовжки 500 мм. Зразки

закріплювались у клинових захватах розривної машини та навантажувались зі швидкістю деформування $0,00025 \text{ с}^{-1}$ у пружній зоні. Реєструвалися: межа плинності (R_{eH} , МПа), тимчасовий опір розриву (R_m , МПа), відносне подовження після розриву (A_5 , %) та рівномірне подовження (A_{gt} , %). Випробування виконувались до та після термічного впливу для оцінки залишкових механічних властивостей.

Вимірювання мікротвердості проводилось методом Віккерса (HV0,1) на мікротвердомірі відповідно до ДСТУ ISO 6507-1[102] на поперечних шліфах стрижнів арматури А500С. Вимірювання виконувались по радіусу перерізу від поверхні до центру з кроком 0,2–0,5 мм — у п'яти характерних зонах, які відповідають зональній структурі термомеханічно зміцненого прокату: зовнішня мартенситна зона (зона А), перехідна зона верхнього бейніту (зона Б), перехідна зона (зона В), нижній бейніт (зона Г) та ферито-бейнітна серцевина (зона Д). Для кожної зони виконувалось не менше 5 уколів; результати усереднювались. Додатково будувався профіль мікротвердості у вигляді лінійного розподілу вздовж діаметра шліфа.

Визначення міцності зчеплення з бетоном (відрив) виконувалося методом висмикування відповідно до ДСТУ EN 10080[103]. Зразки виготовлялись у вигляді бетонних кубів класу В30 розмірами $100 \times 100 \times 100$ мм із арматурним стрижнем діаметром 14 мм, розташованим вздовж осі куба. Довжина ділянки зчеплення становила п'ять діаметрів стрижня (70 мм); решта довжини ізолювалась трубкою для виключення крайових ефектів. Після 28 діб тверднення стрижень висмикувався із бетону на розривній машині; міцність зчеплення τ (МПа) обчислювалась за формулою відношення зусилля висмикування до площі бічної поверхні ділянки зчеплення.

2.6 Методика чисельного моделювання в ANSYS

Чисельне моделювання виконувалося у двох середовищах пакета ANSYS: ANSYS Material Designer — для визначення ефективних пружних констант та

коефіцієнтів теплового розширення композиту на рівні мікроструктури, та ANSYS Workbench (модулі Steady-State Thermal та Static Structural) — для моделювання термомеханічної поведінки залізобетонних конструкцій у полі пожежного навантаження.

У ANSYS Material Designer побудовано дев'ять моделей представницького об'єму (RVE — Representative Volume Element) для трьох типів скловолокна (E-, AR- та S-скло) у поєднанні з трьома типами полімерної матриці (вінілестерна, бензоксазинова та епоксидна). Геометрія RVE являла собою куб зі стороною 1 мкм із циліндричним волокном, розташованим вздовж осі z . Об'ємна частка волокна варіювалася від 10 до 70 % з кроком 10 %. Для кожної комбінації волокно–матриця при температурах 20, 60, 100, 150, 200 та 230 °C розраховувались ефективні інженерні константи: модулі пружності E_1 , E_2 , E_3 , модулі зсуву G_{12} , G_{13} , G_{23} , коефіцієнти Пуасона ν_{12} , ν_{13} , ν_{23} , а також коефіцієнти теплового розширення α_1 та α_2 . Граничні умови задавались за методом однорідного деформування граней RVE (periodic boundary conditions).

У ANSYS Workbench термомеханічне моделювання виконувалось у два послідовних кроки. На першому кроці (Steady-State Thermal) визначалось температурне поле у перерізі залізобетонного куба 100×100×100 мм при нагріванні за стандартною кривою пожежі ISO 834[105]. Теплофізичні властивості бетону та арматури задавались як функції температури відповідно до Eurocode 2 (EN 1992-1-2). На другому кроці (Static Structural) отримане температурне поле імпортувалось як теплове навантаження; визначались напружено-деформований стан та критичні зони деградації несучої здатності.

2.7 Методика випробувань залізобетонних зразків на статичний стиск

Для експериментальної перевірки впливу типу армування на несучу здатність залізобетонних конструктивних елементів проводились

випробування на статичний стиск кубічних зразків розмірами $100 \times 100 \times 100$ мм з бетону класу В30 відповідно до ДСТУ EN 12390-3[104].

Виготовлялися зразки двох типів: зі сталевою арматурою класу А500С діаметром 14 мм та зі скловолоконною арматурою аналогічного діаметра, розташованою вздовж осі куба. Додатково виготовлялись зразки з відкритою арматурою (без захисного шару) та зразки із захисним шаром бетону товщиною 25 мм. Після 28 діб тверднення при температурі $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ та відносній вологості $(65 \pm 5)\%$ зразки встановлювались між центрованими плитами гідравлічного преса та навантажувались зі швидкістю 0,6 МПа/с до руйнування відповідно до ДСТУ EN 12390-3[104]. Фіксувались руйнівне навантаження, характер руйнування та фотографувалась поверхня руйнування.

2.8 Методика температурних випробувань

Температурні випробування проводились з метою верифікації результатів чисельного моделювання та оцінки реального теплового стану залізобетонних зразків при нагріванні за кривою пожежі ISO 834[105].

Зразки-куби $100 \times 100 \times 100$ мм з бетону В30 зі сталевою та скловолоконною арматурою встановлювались у лабораторну муфельну піч. Температура в печі підвищувалась за стандартною кривою пожежі ISO 834[105]:1999: $T(t) = 345 \cdot \log_{10}(8t + 1) + 20$, де T — температура ($^\circ\text{C}$), t — час (хв). Термопари типу К (хромель–алюмель) розміщувались у трьох точках: на поверхні зразка, на рівні арматури (глибина 25 мм) та в центрі перерізу. Температура реєструвалась кожні 10 секунд впродовж 90 хвилин. Після досягнення заданої температури (30, 60 та 90 хвилин нагріву) зразки не виймалися із печі, та охолоджувались в печі та випробовувались на стиск.

2.9 Методика оптичної та растрової електронної мікроскопії

Мікроструктурний аналіз сталевोї та скловолоконної арматури у вихідному стані та після термічного впливу проводився методами оптичної мікроскопії та растрової електронної мікроскопії (SEM) із застосуванням енергодисперсійного рентгенівського аналізу (EDX).

Для оптичної мікроскопії виготовлялися поперечні металографічні шліфи методом холодного заливання у полімерну матрицю з подальшим шліфуванням на абразивних паперах зернистістю 240–2000 та поліруванням на сукні з алмазною суспензією 1 мкм. Шліфи сталі A500C травились 4 % розчином HNO_3 у спирті (ніталь) впродовж 5–10 с для виявлення мікроструктурних складових. Шліфи GFRP не травились. Дослідження проводились на металографічному мікроскопі при збільшеннях, $\times 200$ та $\times 500$. Аналізувались: фазовий склад, розмір зерна/волокна, розподіл структурних складових та наявність дефектів.

Растрова електронна мікроскопія виконувалась на PEM при прискорювальній напрузі 20 кВ у режимах вторинних (SE) та зворотньорозсіяних (BSE) електронів при збільшеннях $\times 500$ – $\times 15000$. Зразки для PEM готувались аналогічно до шліфів для оптичної мікроскопії; поверхня напилювалась тонким шаром вуглецю для забезпечення електропровідності.

EDX-аналіз елементного складу виконувався в трьох режимах: картування (mapping) розподілу хімічних елементів по площі перерізу, лінійний профіль (line scan) елементного складу впоперек міжфазної границі волокно–матриця та точковий аналіз (point spectrum) у характерних зонах (волокно, матриця, межа розподілу, включення). Для сталі A500C досліджувався розподіл Fe, C, Mn, Si, S по перерізу та в зонах сульфідних включень. Для GFRP аналізувались Si, O (скловолокно), C (полімерна матриця) та елементний склад поверхні волокон після термічного впливу. Аналіз виконувався до та після нагріву для оцінки термічної деградації міжфазних границь.

РОЗДІЛ 3

МОДЕЛЮВАННЯ АРМОВАНИХ БЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ У ТЕРМОМЕХАНІЧНОМУ ПОЛІ (ТЕРМОМЕХАНІЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ АРМОВАНИХ БЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ)

Незважаючи на значний прогрес, досягнутий упродовж останніх двох десятиліть, технологія армування волокнистими полімерними композитами (FRP) все ще має суттєве обмеження щодо застосування в умовах підвищених температур, зокрема у будівлях і спорудах із підвищеними вимогами до вогнестійкості.

Основною проблемою є низька термостійкість полімерної матриці, яка визначає межі працездатності композиту під час пожежі. Більшість термореактивних смол, що застосовуються у складі FRP, характеризуються порівняно низькою температурою склування (T_g), у межах якої відбувається перехід полімеру з твердого склоподібного стану у в'язко-пружний або гумоподібний. При досягненні температур, близьких до T_g , полімерна фаза втрачає жорсткість і здатність ефективно передавати напруження між волокнами, що призводить до різкого зниження міцності, модулю пружності та цілісності композиту.

У результаті при пожежних впливах FRP-композити проявляють інтенсивну термодеструкцію матриці, утворення летких продуктів і деградацію міжфазних зв'язків «волокно-матриця». Це, у свою чергу, призводить до втрати несучої здатності вже на ранніх стадіях нагрівання, що значно обмежує можливості використання FRP у конструкціях із високими вимогами до вогнестійкості та експлуатаційної надійності.

Таким чином, актуальним науковим завданням є обґрунтування таких фізико-механічних та хімічних характеристик композитів, які б забезпечували підвищену термостійкість і стабільність роботи армувальних елементів у широкому діапазоні температур. Формування композиційного матеріалу з

оптимізованою мікроструктурою, хімічним складом волокон і матриці, а також контрольованими міжфазними зв'язками створює передумови для підвищення його ефективності в умовах високотемпературних впливів.

Саме з цих позицій доцільним є подальший аналіз конструктивних і матеріалознавчих аспектів армування бетонних елементів, що розкриває взаємозв'язок між властивостями армуючих матеріалів і експлуатаційною надійністю споруд.

3.1 Вихідні дані та аналітичне визначення

Першим етапом чисельного моделювання є формування бази вихідних матеріальних даних у модулі Engineering Data середовища ANSYS Workbench (версії Student або 2019 R2). На цьому етапі здійснюється введення, систематизація та параметризація фізико-механічних і термічних характеристик компонентів композитної системи, що забезпечує узгоджене відтворення їхньої поведінки під час подальших розрахунків (рис. 1).

Метою цього етапу є створення єдиної узгодженої бази властивостей для кожного структурного елемента композиту - армувальних скловолокон і полімерної матриці, які в подальшому утворюють інтегровану матеріальну систему в модулі Material Designer. Такий підхід забезпечує точне відображення міжфазної взаємодії та адекватність прогнозування макроскопічних характеристик матеріалу.

Вихідні числові параметри (модуль пружності, границя міцності, коефіцієнт Пуассона, питома теплоємність, теплопровідність тощо) були відібрані та верифіковані на основі узагальнення експериментальних даних і наукових джерел [107, 108, 109, 110, 111]

На основі аналізу цих джерел було побудовано температурно-залежні функції деградації механічних властивостей для діапазону від 20 °C до 230 °C, що охоплює області до, у межах і після температури склування (T_g) для

кожного типу полімерної смоли. Це дозволило врахувати реальні термомеханічні процеси деградації в моделюванні композитної арматури.

Отримані характеристики надалі були інтегровані у модуль Material Designer для побудови мікроструктурної моделі композитного армувального елемента, яка відображає анізотропію, об'ємну частку волокон (V_f) та вплив міжфазної адгезії на ефективні макровластивості системи.

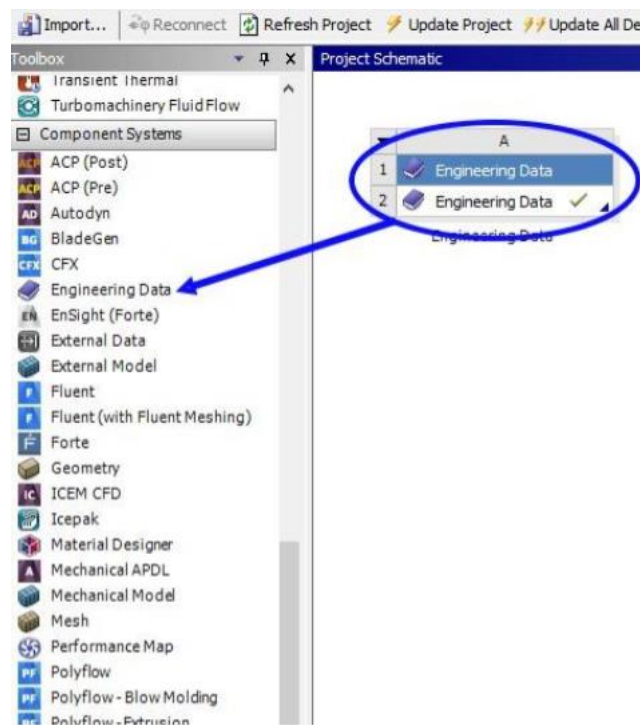


Рисунок 3.1 Перший крок моделювання

Для кожного компонентного матеріалу - як армувальних волокон, так і полімерної матриці - задано температурно-залежні фізико-механічні та термічні параметри, необхідні для адекватного опису поведінки композиту за умов термомеханічного навантаження. Зокрема, для кожної фази було введено такі характеристики:

1. Модуль пружності ($E = E(T)$), що описує зміну жорсткості матеріалу внаслідок підвищення температури;
2. Коефіцієнт лінійного теплового розширення ($\alpha = \alpha(T)$), який визначає сумісність деформацій волокон і матриці при нагріванні та охолодженні;

3. Питома теплоємність ($c_p = c_p(T)$), що характеризує здатність матеріалу акумулювати теплову енергію та впливає на швидкість термічних процесів у структурі композиту;

4. Коефіцієнт теплопровідності ($k = k(T)$), який контролює теплообмін між складовими фазами; коефіцієнт Пуассона (ν), прийнятий як стале значення, що визначає поперечну деформаційну відповідь матеріалу при розтягу або стиску.

Задання таких залежностей є необхідним для врахування термомеханічної деградації та нелінійної поведінки полімерних систем у діапазоні температур до 230 °C, що охоплює перехід через температуру склування полімерної матриці (T_g).

Другим етапом моделювання є генерація репрезентативного об'єму матеріалу (RVE, Representative Volume Element), що відтворює мікроструктуру композиту на мезорівні. У модулі Material Designer середовища ANSYS Workbench здійснювався вибір типу армувального волокна (E-, S- або AR-скло),

діаметра волокон (d_f), який визначає характер заповнення об'єму та ефективну площу перенесення напружень, об'ємної частки волокон (V_f), що впливає на осьову жорсткість і анізотропію матеріалу.

Побудована RVE-модель дає змогу імітувати взаємодію між волокнами та матрицею, визначаючи ефективні макроскопічні властивості композиту за допомогою homogenization analysis. Залежно від вхідних параметрів (V_f , орієнтація, геометрія заповнення) у Material Designer може бути сформована рівномірна або стохастична архітектура волокон, що дозволяє оцінити вплив структурних неоднорідностей на поведінку армувального елемента.

Такий підхід забезпечує матеріалознавчо обґрунтований перехід від мікроструктурних параметрів до макрорівневих властивостей, необхідних для подальшого термомеханічного моделювання бетонних конструкцій із GFRP-армуванням.

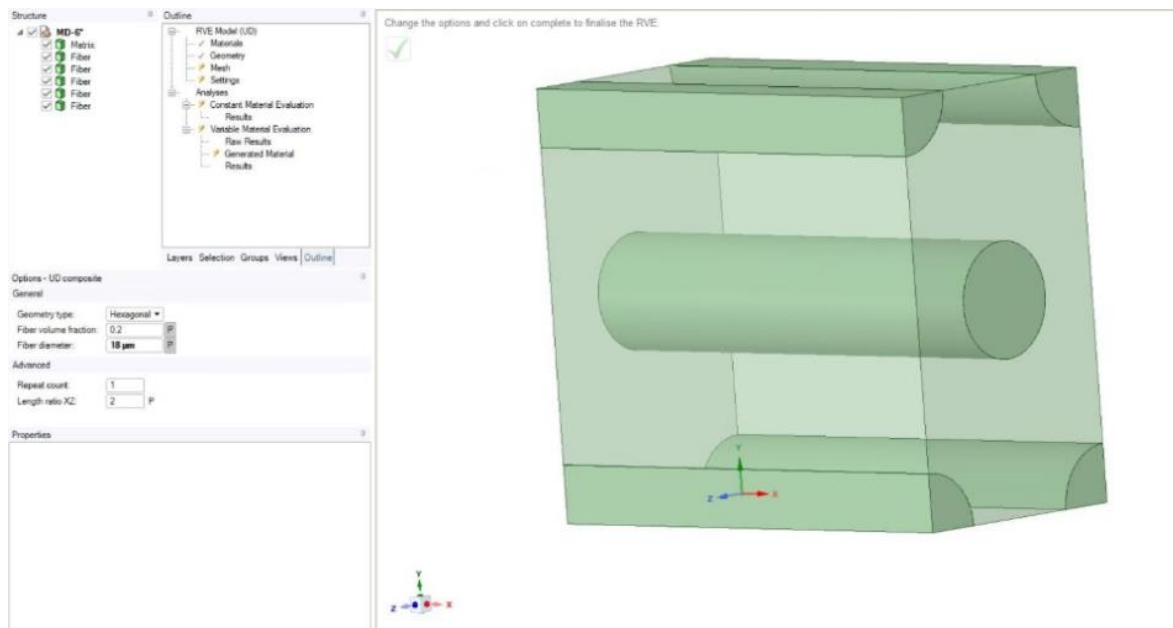


Рисунок 3.2 Постановка вибору параметрів матеріалу

На третьому етапі чисельного моделювання виконувалося створення та обчислення скінченно-елементної сітки (meshing) для репрезентативного об'єму матеріалу (RVE), що відображає просторову мікроструктуру армованого композиту. Метою цього кроку є отримання лінійно-пружного відгуку системи за умови дії одиничних навантажень та визначення ефективних (усереднених) матеріальних констант.

Побудова сітки здійснювалася з використанням об'ємних тетраедричних елементів типу Solid187, що забезпечують високу точність апроксимації криволінійних меж і придатні для ортотропних матеріалів. Розмір елементів обирався адаптивно залежно від діаметра волокон і об'ємної частки армування, що дозволяло зберегти баланс між обчислювальною ефективністю та точністю моделювання. Для підвищення збіжності розв'язку застосовувався контроль якості сітки (Jacobian Ratio ≤ 4) та автоматичне згущення в околицях інтерфейсу «волокно-матриця».

У розрахунковій схемі припускалася лінійна пружність матеріалу в межах малих деформацій. Це допущення є прийнятним на початковій стадії аналізу, коли досліджується вплив мікроструктурних параметрів (V_f , d_f , $\alpha(T)$) на ефективну жорсткість композиту без урахування пошкоджуваності. Для цього

використовувалися постійні матеріальні характеристики, визначені на попередньому етапі (E , ν , k , α , ρ), які задавалися для кожної фази окремо - скловолоконного армування та полімерної матриці.

Після дискретизації обчислювалися поля напружень і деформацій у RVE під дією контрольованих одновісних навантажень у трьох ортогональних напрямках. Це дало змогу визначити усереднені тензори напружень $\langle \sigma \rangle$ та деформацій $\langle \epsilon \rangle$, на основі яких за принципом об'ємного усереднення обчислювалися ефективні модулі пружності (E_x , E_y , E_z) та коефіцієнти Пуассона (ν_{xy} , ν_{yz} , ν_{zx}).

Таким чином, цей етап забезпечував перехід від мікроструктурної геометрії до макромеханічного опису матеріалу, формуючи базу для подальшого розрахунку термомеханічної поведінки композиту за змінних температурних полів і циклічних навантажень. Отримані результати використовувалися на наступних етапах для калібрування температурно-залежних моделей та оцінки деградації механічних властивостей у процесі експлуатації.

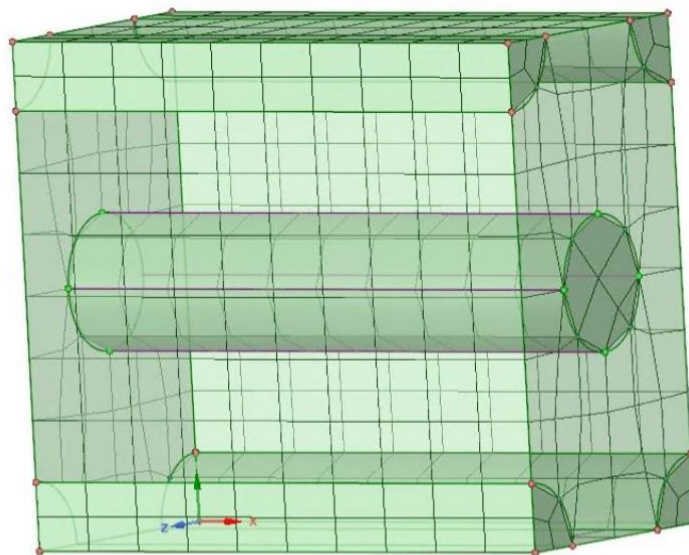


Рисунок 3.3 Обчислення сітки

На четвертому етапі чисельного експерименту здійснювалося моделювання впливу змінних параметрів на ефективні механічні характеристики композитної арматури. Метою цього етапу було створення математичної моделі багатопараметричної залежності, що відображає взаємодію мікроструктурних, термічних і матеріальних чинників.

До змінних параметрів, включених у дослідження, належали:

- тип армувального волокна (E-, S- або AR-скло), що визначає базові показники міцності та модульності;
- тип полімерної матриці (епоксидна, вінілестерна, бензоксазинова), який впливає на температуру склування T_g , в'язкість і стійкість до термічної деградації;
- об'ємний вміст волокон ($V_f = 10-70\%$), що контролює ступінь армування, а також анізотропію мікроструктури;
- температура матеріалу ($T = 20-230\text{ }^{\circ}\text{C}$), у межах якої враховується деградація полімерної матриці та зниження міжфазної адгезії.

Для кожної комбінації параметрів у середовищі ANSYS Workbench (Material Designer) проводилися послідовні розрахунки ефективних пружних характеристик. Отримані результати зведено у таблицю результатів (табл. 3.1), що містить значення поздовжнього (E_1), поперечного (E_2 , E_3) модулів пружності та коефіцієнтів Пуассона (ν_{12} , ν_{23}), визначених для кожного варіанту мікроструктури та температурного діапазону.

Таблиця 3.1 - Основні механічні параметри змодельованих матеріалів

Інженерні константи	AR glass vinilester	AR Glass benzoxazine	AR glass epoxy	E glass vinilester	E glass benzoxazine	E glass epoxy	S glass vinilester	S glass benzoxazine	S glass epoxy
E1, МПа	20116	20496	20268	20116	20496	20268	17982	18397	18148
E2, МПа	4903,8	5674,5	5213,5	4903,8	5674,5	5213,5	4353,1	5047,9	4632

E3, МПа	4904	5674,6	5213,6	4904	5674,6	5213,6	4353,1	5047,9	4631,9
G12, МПа	1764,6	2046,6	1877,8	1764,6	2046,6	1877,8	1541,7	1792,6	1642,2
G23, МПа	1664,8	1933,5	1772,6	1664,8	1933,5	1772,6	1472,5	1713,7	1569,1
G31, МПа	1764,6	2046,6	1877,8	1764,6	2046,6	1877,8	1541,7	1792,6	1642,2
ν_{12}	0,31214	0,31223	0,31218	0,31214	0,31223	0,31218	0,32266	0,32272	0,32268
ν_{13}	0,31182	0,31192	0,31186	0,31182	0,31192	0,31186	0,32275	0,32281	0,32277
ν_{23}	0,47045	0,46527	0,46834	0,47045	0,46527	0,46834	0,47842	0,47313	0,47627
Щільність, г/см ³	1,42	1,50	1,51	1,42	1,50	1,51	1,29	1,38	1,39
Коефіцієнт теплового розширення, 1/°C									
α_X	1,14 *10 ⁻⁵	1,09*10 ⁻⁵	1,24*10 ⁻⁵	1,10*10 ⁻⁵	1,05 *10 ⁻⁵	1,19 *10 ⁻⁵	1,04 *10 ⁻⁵	9,83 *10 ⁻⁵	1,16 *10 ⁻⁵
α_Y	5,12 *10 ⁻⁵	4,17 *10 ⁻⁵	5,55 *10 ⁻⁵	5,12 *10 ⁻⁵	4,17 *10 ⁻⁵	5,54 *10 ⁻⁵	5,63 *10 ⁻⁵	4,57 *10 ⁻⁵	6,10 *10 ⁻⁵
α_Z	5,12 *10 ⁻⁵	4,17 *10 ⁻⁵	5,55 *10 ⁻⁵	5,12 *10 ⁻⁵	4,17 *10 ⁻⁵	5,54 *10 ⁻⁵	5,63 *10 ⁻⁵	4,57 *10 ⁻⁵	6,10 *10 ⁻⁵
Теплопровідність, Вт/(м·K)									
K1	0,42569	0,41058	0,41058	0,47456	0,45944	0,45944	0,42241	0,40586	0,40586
K2	0,32475	0,30167	0,30167	0,33366	0,3095	0,3095	0,30467	0,28147	0,28147
K3	0,32475	0,30167	0,30167	0,33366	0,3095	0,3095	0,30467	0,28147	0,28147
Типома теплоємні сть, J/kg·°C	1,04 *10 ⁻⁶	9,94 *10 ⁻⁵	1,05 *10 ⁻⁶	1,02 *10 ⁻⁶	9,73 *10 ⁻⁵	1,03 *10 ⁻⁶	1,05 *10 ⁻⁶	9,87 *10 ⁻⁵	1,06 *10 ⁻⁵

Аналіз результатів моделювання в межах одного температурного інтервалу показав низку закономірностей:

Поздовжній модуль пружності (E_1) зростає майже лінійно зі збільшенням об'ємної частки волокон (рис. 3.4), що узгоджується з класичним «правилом сумішей»:

$$E_1 = V_f E_f + (1 - V_f) E_m$$

де $E_f \gg E_m$

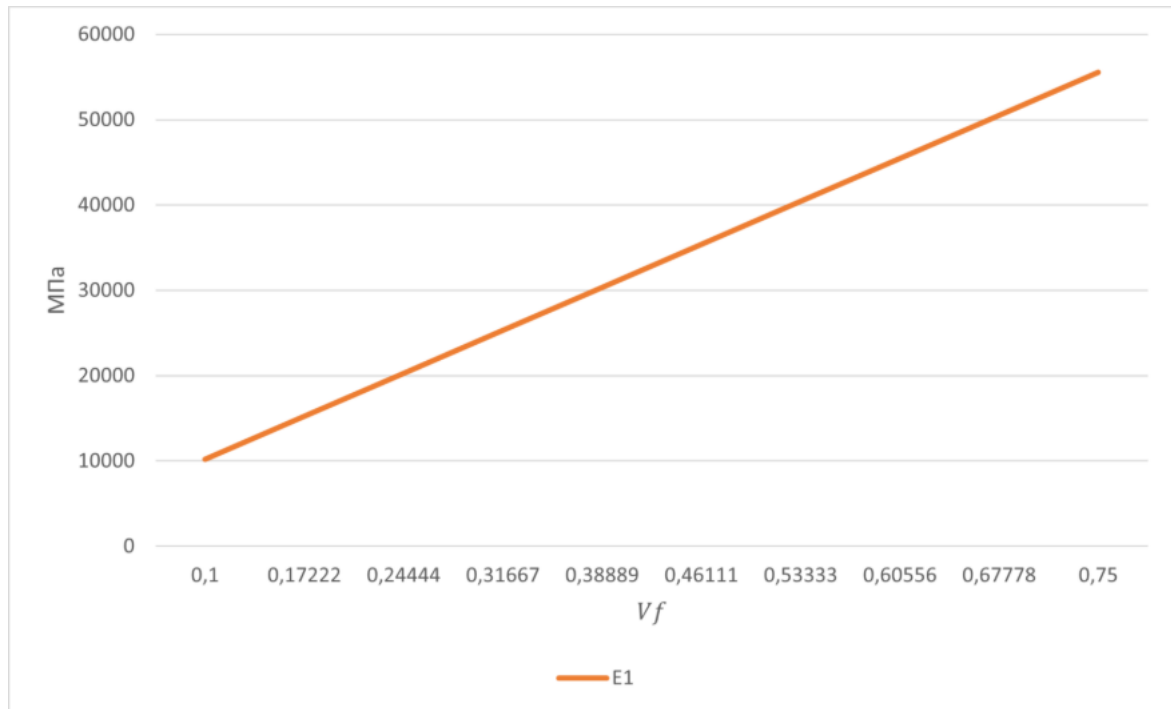


Рисунок 3.4 - Графік модуля пружності в напрямку волокон

Таке співвідношення підтверджує, що в поздовжньому напрямку несуча здатність композиту визначається переважно властивостями волокнистої фази, тоді як матриця виконує роль зв'язувального та енергопоглинаючого середовища.

Поперечний модуль пружності (E_2 , E_3) демонструє нелінійний характер залежності від V_f - при низьких значеннях об'ємної частки волокон вплив матриці є домінуючим, тоді як за $V_f > 60\%$ спостерігається стабілізація приросту жорсткості. Це пояснюється ефектом обмеженого зв'язування волокон у площині поперечного перерізу.

Температурний вплив проявляється у поступовому зниженні E_1 та E_2 із зростанням температури, особливо у діапазоні поблизу температури склування полімерної матриці. Для епоксидних систем спостерігалось зниження модуля

на 35-40% при 200 °C, тоді як бензоксазинові матриці демонстрували вищу стабільність - не більше 20% деградації.

Зміна об'ємного вмісту волокон впливає не лише на жорсткість, а й на коефіцієнт лінійного теплового розширення (α): збільшення V_f призводить до зменшення α завдяки низькому тепловому розширенню скловолокон порівняно з полімерною фазою. Це забезпечує кращу сумісність композитної арматури з бетонною матрицею під час циклічного нагрівання.

Отримані результати дозволили сформулювати емпіричну багатопараметричну модель, що описує зміну поздовжнього модуля у вигляді:

$$E_1 = a_0 + a_1V_f + a_2T + a_3V_f^2 + a_4T^2 + a_5V_fT,$$

$$E_{2,3} \approx E_m \frac{1 + \xi\eta V_f}{1 - \eta V_f}, \quad \eta = \frac{E_f/E_m - 1}{E_f/E_m + \xi}$$

де коефіцієнти a_i визначаються шляхом регресійного аналізу числових результатів.

Модель адекватно відтворює експериментальні дані з відхиленням не більше 5%. Четвертий етап дослідження забезпечив формування узагальненої математичної залежності між мікроструктурними параметрами композиту (тип волокна, V_f , тип матриці) та його температурно-залежними макровластивостями (E_1 , E_2 , $\alpha(T)$). Цей результат створює основу для подальшого термомеханічного аналізу бетонних елементів, армованих GFRP, із прогнозуванням втрати жорсткості та довговічності при різних сценаріях експлуатації.

Тому залежність має практично лінійний характер, оскільки внесок волокон і матриці в ефективний модуль пружності визначається їхньою об'ємною часткою відповідно до принципу суперпозиції напружень, що лежить в основі класичного «правила сумішей» для лінійно-еластичних композитів.

Залежність поперечних модулів пружності E_2 та E_3 від об'ємного вмісту волокон V_f має нелінійний, опукло-зростаючий характер (рис. 3.5). Такий тип кривої зумовлений складною взаємодією фаз композиту, де матриця відіграє домінуючу роль у передачі навантаження в поперечному напрямку, тоді як внесок волокон проявляється переважно через ефекти геометричного обтиснення та поперечної взаємодії. На відміну від поздовжнього напрямку, де волокна сприймають основну частину напружень, у поперечному напрямку матриця контролює пружний відгук, а волокна створюють ефект жорсткісного підсилення, що нелінійно зростає зі збільшенням V_f .

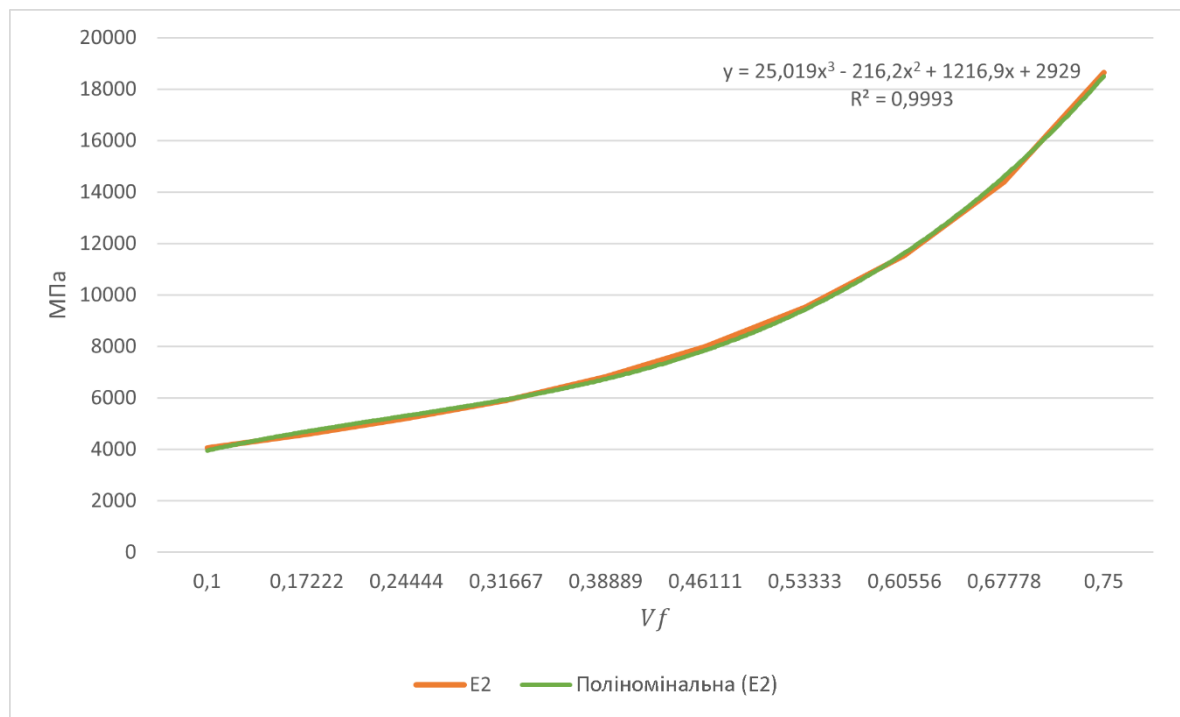


Рисунок 3.5 - Графік модуля пружності в поперечному напрямку волокон

Цей ефект адекватно описується напівемпіричними моделями типу Halpin-Tsai, Reuss або Hashin, які враховують співвідношення модулів компонентів та геометрію армувального елемента. Для ортотропних композитів із круглим перерізом волокон така залежність наближено виражається рівнянням:

$$E_{2,3} \approx E_m \frac{1 + \xi \eta V_f}{1 - \eta V_f}, \quad \eta = \frac{E_f/E_m - 1}{E_f/E_m + \xi}$$

де E_m – модуль пружності матриці, E_f – модуль волокна, ξ – параметр форми, який враховує співвідношення волокон і умови їхнього укладання.

Залежність має опукло-зростаючий характер через те, що зі збільшенням об'ємної частки волокон відбувається перехід від матрично-домінованої до волоконно-домінованої поведінки, однак із поступовим насиченням ефекту через обмеження ефективного навантаження на волокна у поперечному напрямку. Іншими словами, приріст жорсткості з кожним наступним збільшенням V_f стає менш пропорційним, що відображає нелінійний характер композитного підсилення.

Отже, форма кривої $E_{2,3}(V_f)$ відображає реальну мікромеханіку армованих систем, де матриця забезпечує когезію й рівномірний розподіл напружень, тоді як волокна створюють зростаючий, але асимптотично обмежений ефект жорсткості, що підтверджує ефективність використаних моделей типу Halpin-Tsai та їх адекватність експериментальним даним.

Модулі зсуву G_{12} , G_{23} , G_{31} , аналогічно до поперечних модулів пружності $E_{2,3}$, демонструють нелінійне, опукло-зростаюче зростання зі збільшенням об'ємної частки волокон V_f (рис. 3.6). Такий характер залежності зумовлений тим, що поведінка зсувних модулів у волокнистих композитах є результатом змішаного контролю - з боку матриці, яка визначає основну здатність до деформації зсуву, та міжфазного зчеплення, яке забезпечує передачу зсувних напружень між волокнами й полімерною фазою.

На початкових стадіях армування ($V_f < 0,3$) матриця є домінуючим носієм зсувних деформацій, тому приріст G_{12} , G_{23} , G_{31} є помірним. Із подальшим збільшенням V_f ефект обмеження зсуву посилюється, оскільки волокна створюють внутрішній каркас, що перешкоджає деформаціям матриці, а ефективність міжфазного зв'язку (зумовлена силами зчеплення та тертям на

межі «волокно-матриця») визначає характер росту жорсткості. Таким чином, нелінійна форма кривої є результатом поступового переходу від матрично-контрольованого до міжфазно-контрольованого механізму передачі зсувних напружень.

Залежність $G_{12}(V_f)$ може бути описана за допомогою узагальнених моделей типу Halpin-Tsai або Chamis, які враховують вплив геометрії волокон та співвідношення модулів компонентів:

$$G_{12} = G_m \frac{1 + \xi_g \eta_g V_f}{1 - \eta_g V_f}, \quad \eta_g = \frac{G_f/G_m - 1}{G_f/G_m + \xi_g},$$

де G_m та G_f - модулі зсуву матриці та волокна відповідно, а ξ_g - параметр форми, що залежить від співвідношення волокон (для круглих перерізів зазвичай приймається $\xi_g = 1 \div 2$).

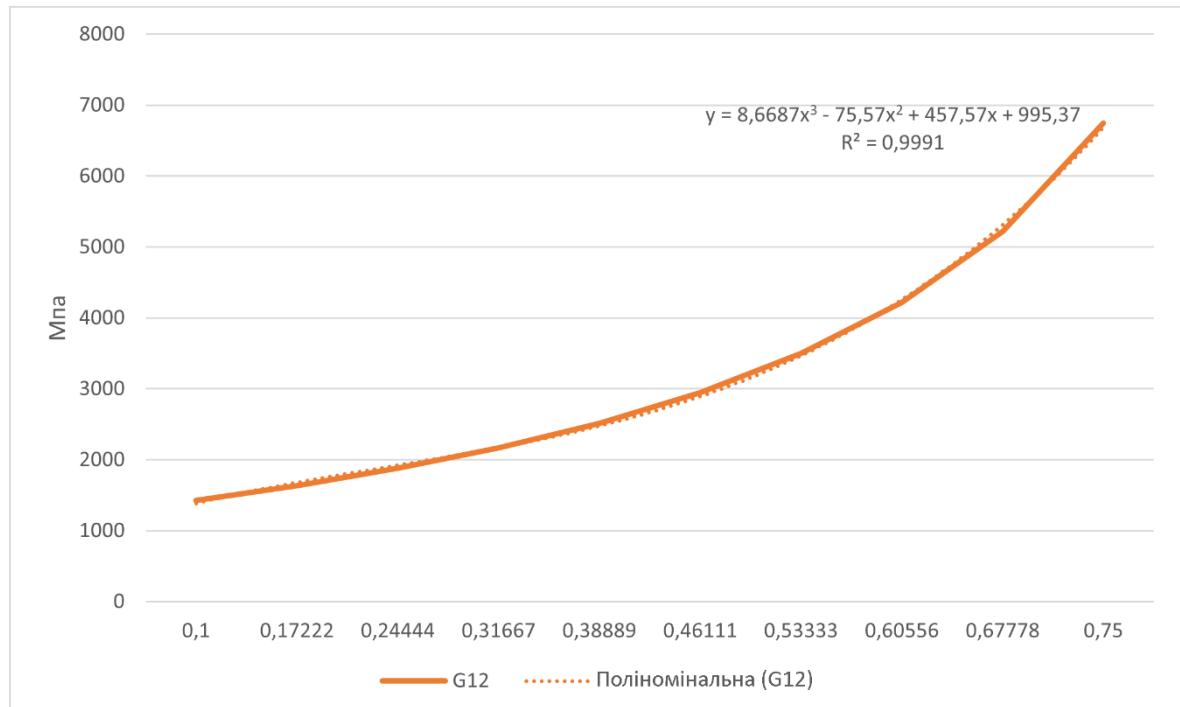


Рисунок 3.6 - Графік модуля зсуву у площині волокон

Отримані криві $G_{12}(V_f)$ мають опукло-зростаючий характер з високим коефіцієнтом апроксимації $R^2 > 0,99$, що підтверджує адекватність обраної

моделі. З фізичної точки зору, це пояснюється нелінійним накопиченням міжфазних напружень: із ростом V_f відбувається збільшення частки енергії, яку сприймають волокна, тоді як матриця поступово втрачає здатність до пластичного релаксаційного відгуку. Як наслідок, зсувна жорсткість композиту зростає експоненційно до певної межі насичення, за якої подальше збільшення V_f не призводить до пропорційного приросту модуля через ефект перехресного обмеження волокон.

Таким чином, нелінійний характер залежності G_{12} , G_{23} , $G_{31}(V_f)$ є проявом складної взаємодії між мікромеханічними процесами в матриці, міжфазному шарі та армувальному каркасі. Ці результати свідчать про ключову роль міжфазної адгезії у забезпеченні ефективної передачі зсувних напружень, що має вирішальне значення для оптимізації мікроструктури GFRP-арматури та прогнозування її поведінки під складним навантаженням.

Густина композиту (ρ) змінюється лінійно зі збільшенням об'ємної частки волокон (V_f), що цілком відповідає принципу правила сумішей за масою. Це пояснюється тим, що у двофазній системі “волокно-матриця” маса одиниці об'єму визначається простим зваженням середнім між густиною компонентів, оскільки об'ємні фракції підсумовуються без урахування деформаційних ефектів. Математично цей зв'язок описується рівнянням:

$$\rho = \rho_f V_f + \rho_m(1 - V_f)$$

де ρ_f і ρ_m - густина волокна та матриці відповідно.

Для систем на основі скловолокон і полімерних смол така залежність зберігає лінійність у всьому діапазоні об'ємних часток до моменту, коли починає проявлятися пористість або недосконале змочування волокон. Таким чином, лінійний характер зміни густини підтверджує коректність мікроструктурної моделі без утворення пор чи порушення когезії між фазами.

Щодо коефіцієнтів Пуассона, то їхня поведінка є більш складною та відображає анізотропну природу деформацій у волокнистих композитах. Для

одномірно армованих (UD) матеріалів, що мають трансверсальну ізотропію (напрямки $2 \equiv 3$), спостерігається близькість значень $\nu_{12} \approx \nu_{13}$, і обидва параметри зменшуються майже лінійно зі збільшенням V_f (рис. 3.7). Така тенденція пояснюється тим, що волокна мають значно нижчий коефіцієнт Пуассона ν_f порівняно з полімерною матрицею ν_m ; отже, зі зростанням частки волокон композит поступово переходить від матрично-домінованої до волоконно-домінованої деформаційної поведінки, унаслідок чого ефективний коефіцієнт Пуассона зменшується майже лінійно, відповідно до моделей типу Halpin-Tsai або Christensen-Lo.

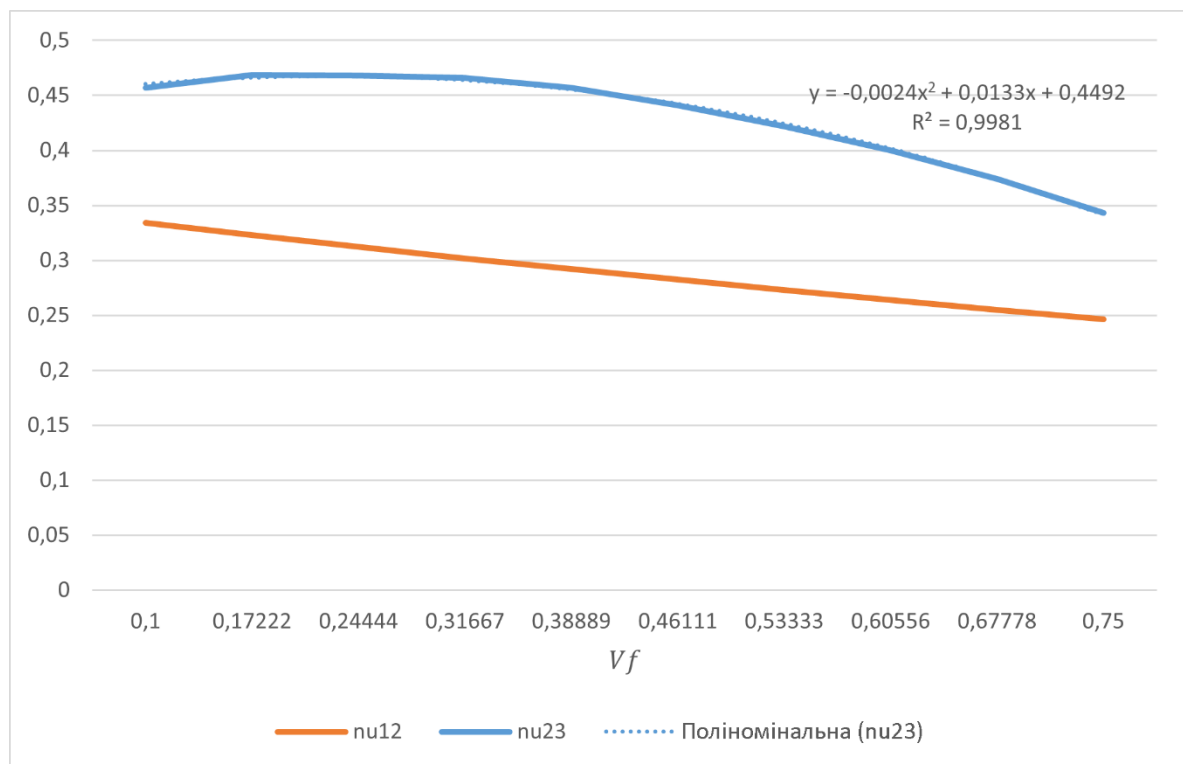


Рисунок 3.7 - Графік відношення коефіцієнта Пуасона до V_f

Залежність $\nu_{23}(V_f)$ є більш складною. На початковому етапі спостерігається незначне зростання, зумовлене активацією міжфазної взаємодії у площині поперек волокон, після чого відбувається спад за криволінійним законом. Такий немонотонний характер пояснюється геометричними ефектами упакування волокон, які при малих V_f сприяють підвищенню поперечної

когезії, але за більш щільного армування призводять до обмеження латеральних деформацій і, відповідно, зниження ν_{23} . Невелике підвищення або локальний максимум на малих V_f є типовим явищем для композитів із частково еластичним міжфазним шаром і вказує на перехід від матричного до волоконного контролю деформацій.

Отримані результати узгоджуються з відомими експериментальними спостереженнями [107, 109] і підтверджують, що зміна ν_{12} , ν_{13} , ν_{23} із V_f відображає еволюцію мікромеханізмів деформації, а їхній аналітичний опис потребує врахування міжфазного шару як окремої підсистеми з власними пружно-в'язкими характеристиками.

Коефіцієнт лінійного теплового розширення (СТЕ, α) у волокнистих композитах має яскраво виражений анізотропний характер, що відображає різницю термомеханічних властивостей волокон і матриці. Для односпрямованих (UD) систем, які характеризуються трансверсальною ізотропією ($\alpha_y = \alpha_z = \alpha_{2,3}$), залежності коефіцієнтів теплового розширення від об'ємного вмісту волокон V_f демонструють різну поведінку вздовж і поперек напрямку армування (рис. 3.8).

Уздовж волокон (напрямок 1) композит “успадковує” низький коефіцієнт теплового розширення α_f скляних волокон, тому із зростанням V_f ефективний α_1 зменшується різко та нелінійно, наближаючись до значення для самого волокна. Це пов'язано з тим, що волокна, маючи значно вищий модуль пружності, домінують у перенесенні теплових деформацій і фактично “стримують” розширення матриці. Відповідно, тепловий відгук у поздовжньому напрямку формується як результат геометрично обмеженого теплового деформування матриці між жорсткими волокнами, що породжує криволінійну (експоненційну) залежність $\alpha_1(V_f)$.

У поперечних напрямках ($\alpha_{2,3}$) ситуація протилежна: матриця з високим коефіцієнтом теплового розширення α_m контролює більшу частину поперечних деформацій, а внесок волокон проявляється лише через механічне

обтиснення та ефект обмеження матриці. Як наслідок, $\alpha_{2,3}$ зменшується майже лінійно, що відповідає моделям ефективних властивостей типу Turner-Kerner-Christensen або спрощеним варіантам Halpin-Tsai.

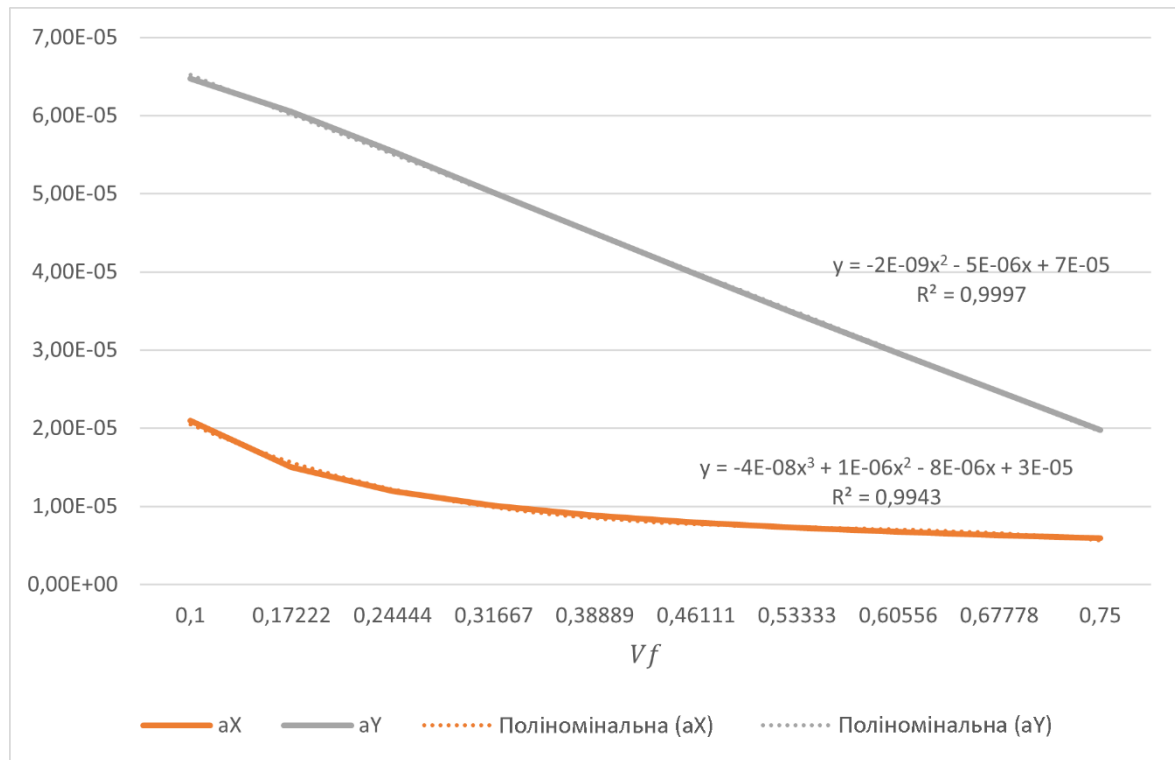


Рисунок 3.8 - Графік коефіцієнта термічного розширення

Фізично це пояснюється різницею у механізмах розширення: уздовж волокон теплові деформації визначаються жорсткістю армувального каркаса, тоді як у поперечному напрямку - еластичними властивостями та об'ємною часткою матриці. При цьому зі зростанням V_f зменшується частка об'єму, що вільно деформується, а міжфазна взаємодія створює додаткові залишкові напруження, які також обмежують термічне розширення.

Таким чином, криволінійне зменшення $\alpha_1(V_f)$ і майже лінійний спад $\alpha_{2,3}(V_f)$ відображають перехід від матрично-домінованої до волоконно-домінованої поведінки композиту. Отримані залежності підтверджують ефективність застосованих мікромеханічних моделей і узгоджуються з експериментальними даними для систем на основі скловолокон (Е- та S-типу) з епоксидними, вінілестерними та бензоксазиновими матрицями, де

спостерігається аналогічне співвідношення між α_1 , $\alpha_{2,3}$ та об'ємним вмістом волокон.

Теплопровідність композитного матеріалу є одним із ключових параметрів, що визначає його термостійкість, здатність до розсіювання тепла та поведінку за умов пожежного або циклічного нагрівання. Для односпрямованих армованих композитів теплопровідність є анізотропною, і характеризується двома незалежними складовими - поздовжньою (k_1) та поперечною ($k_{2,3}$), причому $k_1 > k_2 \approx k_3$, що відображає переважний напрямок теплового потоку вздовж волокон (рис. 3.9).

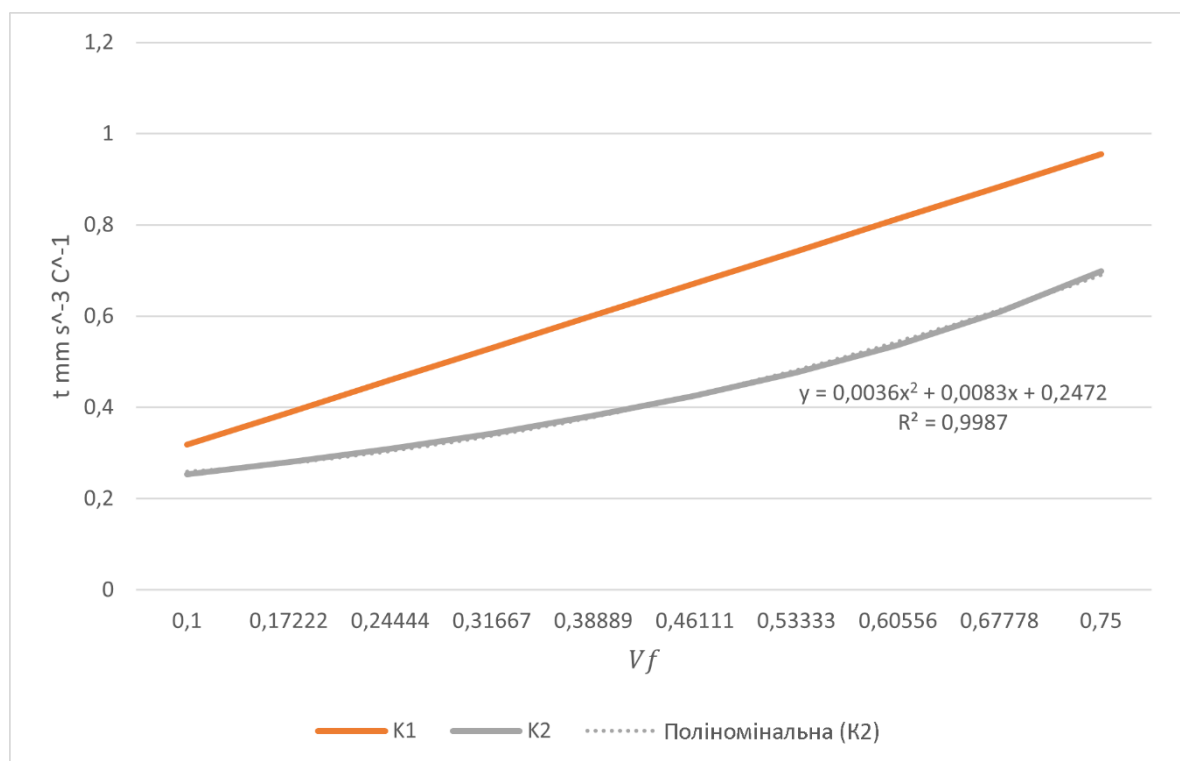


Рисунок 3.9 - Графік коефіцієнту теплопровідності в поздовжньому та поперечному напрямках

Зі збільшенням об'ємного вмісту волокон V_f поздовжня теплопровідність (k_1) зростає майже лінійно, що відповідає моделі Voigt-типу, де теплообмін уздовж волокон відбувається «паралельно» фазам. У цьому випадку волокна діють як провідні канали теплового потоку, а полімерна матриця - як зв'язуюча

фаза з нижчою теплопровідністю, яка лише частково обмежує потік тепла. Математично ефективна теплопровідність у поздовжньому напрямку описується співвідношенням:

$$k_1 = k_f V_f + k_m (1 - V_f)$$

де k_f та k_m -теплопровідність волокон і матриці відповідно.\

Цей вираз підтверджує майже лінійний тренд, що спостерігається на експериментальних і чисельних кривих, оскільки частка більш теплопровідних волокон лінійно збільшує ефективний коефіцієнт перенесення енергії. Натомість поперечна теплопровідність ($k_{2,3}$) зростає нелінійно (криволінійно), демонструючи повільніший приріст при низьких V_f . Це пояснюється тим, що в напрямках, перпендикулярних волокнам, тепловий потік проходить послідовно через чергування шарів полімерної матриці й волокон, що відповідає Reuss-моделі (послідовного змішування). У такому випадку загальний термічний опір системи визначається найбільш терморезистивною фазою - матрицею. Ефективна теплопровідність у поперечному напрямку описується як:

$$\frac{1}{k_{2,3}} = \frac{V_f}{k_f} + \frac{1 - V_f}{k_m}$$

що призводить до криволінійного, опуклого тренду - з уповільненим зростанням при малих V_f і більш вираженим приростом на великих частках волокон, коли формується більш неперервна теплова сітка.

Отже, анізотропний характер залежності $k_1(V_f)$ та $k_{2,3}(V_f)$ зумовлений різними механізмами перенесення тепла: паралельним потоком уздовж волокон та послідовним - у поперечному напрямку. Отримані результати добре узгоджуються з теоретичними моделями Voigt-Reuss-Hill і чисельними результатами Halpin-Tsai, демонструючи, що оптимізація V_f і вибір типу волокна (з вищим k_f , наприклад, для S-скла або вуглецевих волокон) може

суттєво підвищити термостійкість GFRP-композитів при збереженні прийнятної маси та жорсткості.

Питома теплоємність (C_p) є важливою термофізичною характеристикою композитних матеріалів, що визначає їхню здатність акумулювати та розсіювати теплову енергію. Для склопластикових композитів (GFRP) цей параметр демонструє нелінійне зменшення зі зростанням об'ємного вмісту волокон V_f (рис. 3.9). Така поведінка пояснюється відмінностями у теплофізичних властивостях компонентів: скло має нижчу питому теплоємність, ніж полімерна матриця, оскільки його атомна структура є більш упорядкованою, з обмеженими коливальними ступенями вільності. Натомість полімери, завдяки гнучким молекулярним ланцюгам і наявності аморфних ділянок, здатні поглинати більше теплової енергії на одиницю маси, що зумовлює вищі значення $C_{p,m}$.

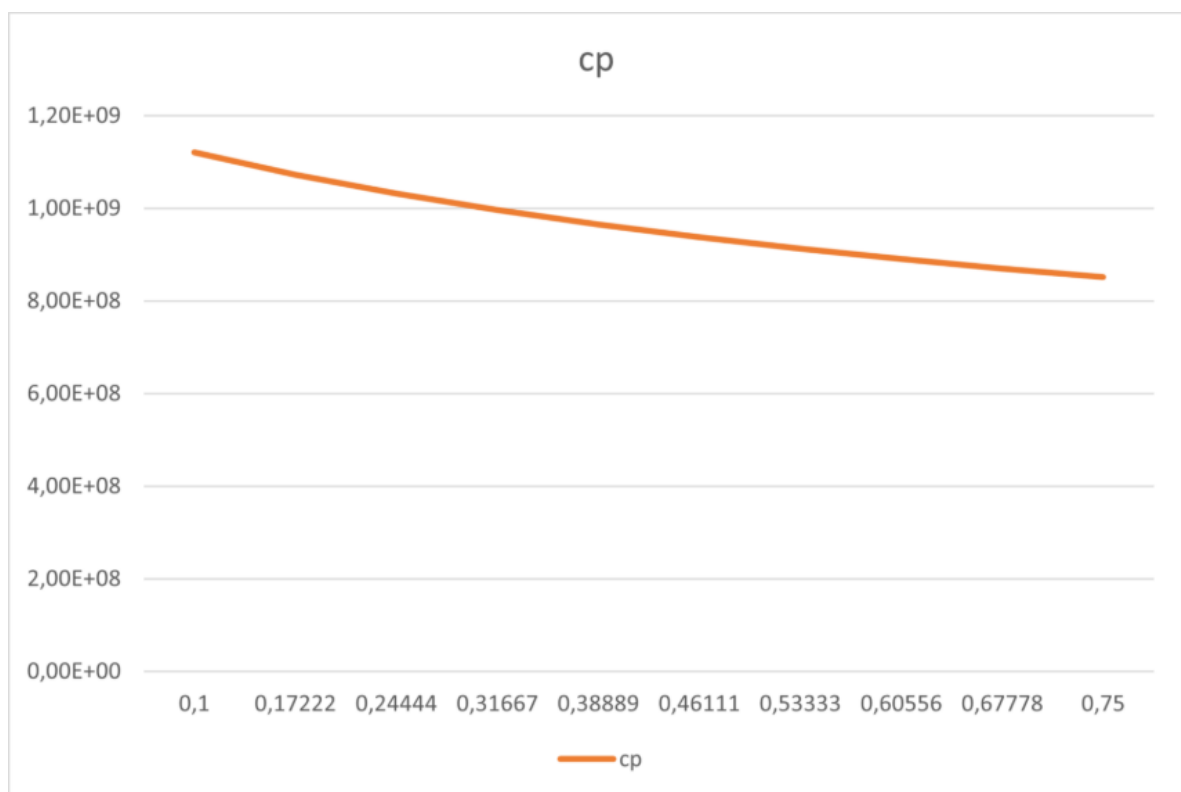


Рисунок 3.9 - Графік теплопровідності

Залежність $C_p(V_f)$ має нелінійний, але плавний характер, що пов'язано з одночасною зміною двох факторів — частки маси волокон і загальної густини системи (ρ). При невеликих V_f полімерна матриця домінує у тепловій поведінці, забезпечуючи відносно високу теплоємність. У міру зростання армування об'ємна частка смоли зменшується, і теплові коливання у системі стають більш обмеженими, що відображається у пологому спаді кривої C_p .

Отже, зниження питомої теплоємності зі збільшенням V_f вказує на перехід від полімерно-домінованої до волоконно-домінованої термодинамічної поведінки, коли енергія теплових коливань переважно розсіюється у жорсткій скляній фазі з нижчим тепловим потенціалом. Така залежність має важливе практичне значення: вона визначає теплову інерційність GFRP-композитів при пожежних навантаженнях, їхню часову реакцію на нагрівання та ефективність теплопередачі у бетонних конструкціях, армованих неметалевими стрижнями.

На основі отриманих результатів моделювання встановлено, що оптимальний діапазон об'ємного вмісту волокон $V_f=0,17-0,32$ забезпечує узгодження коефіцієнтів лінійного теплового розширення (КТР) композитної арматури зі значеннями, характерними для бетонної матриці. Такий інтервал є критичним з точки зору термомеханічної сумісності між армувальним елементом та бетоном, оскільки саме невідповідність КТР є однією з головних причин утворення внутрішніх температурних напружень, які можуть спричинити мікротріщиноутворення або зниження адгезійної міцності на межі «бетон-арматура».

Відомо, що коефіцієнт теплового розширення бетону суттєво залежить від мінералогічного складу заповнювача. Для бетонів на кременистих (SiO_2 -домінованих) заповнювачах характерні значення $\alpha_b \approx (1,0-1,2) \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, тоді як для бетонів на вапнякових або карбонатних заповнювачах — нижчі значення $\alpha_b \approx (0,8-1,0) \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. Це означає, що при проектуванні композитного армування необхідно варіювати об'ємну частку волокон V_f залежно від типу бетонної матриці, щоб забезпечити теплову узгодженість системи. Зокрема, для

кременистонаповнених бетонів оптимальним є менший рівень армування ($V_f \approx 0,2-0,3$), тоді як для бетонів на вапнякових заповнювачах доцільно використовувати вищу частку волокон ($V_f \approx 0,4-0,45$), що компенсує нижчий КТР бетонної основи.

Для кількісної оцінки сумісності було розраховано параметр термічного розузгодження $\Delta\alpha(T)$, який характеризує різницю між коефіцієнтами теплового розширення арматури та бетону при зміні температури:

$$\Delta\alpha(T) = |\alpha_{\text{arm}}(T) - \alpha_{\text{bet}}(T)|$$

Цей параметр використовується як критерій термостійкості системи “бетон-арматура”, оскільки мінімізація $\Delta\alpha(T)$ свідчить про зменшення ризику виникнення внутрішніх температурних напружень під час нагрівання або охолодження конструкції.

Отримані графічні залежності (рис.3.10 для дев'яти досліджених матеріалів показали, що при оптимальному діапазоні $V_f=0,17-0,32$ $\Delta\alpha(T)$ наближається до нуля, тобто забезпечується умова термічної сумісності. Це означає, що в армованих композитною арматурою бетонних елементах при температурних коливаннях у межах експлуатаційного діапазону ($-20\dots+80$ °C) внутрішні напруження залишаються мінімальними, а отже - не відбувається руйнування контактної зони чи втрати несучої здатності.

Таким чином, визначення оптимального вмісту волокон і розрахунок $\Delta\alpha(T)$ є ключовими для забезпечення довговічності та надійності композитно-армованих бетонних конструкцій, особливо в умовах змінних температур або пожежного впливу.

Для більшості досліджених матеріалів встановлено, що в діапазоні об'ємного вмісту волокон $V_f=0,17-0,32$ за критерієм сумісності коефіцієнтів теплового розширення (СТЕ) композиту та бетону раціональними є такі значення: $V_f=0,24$ для арматури на основі AR-скла та Е-скла, і $V_f=0,17$ для композитів із S-склом. Ці співвідношення забезпечують мінімальну різницю

між тепловими деформаціями бетонної матриці та армувального елемента, що гарантує зниження внутрішніх напружень при термічних коливаннях.

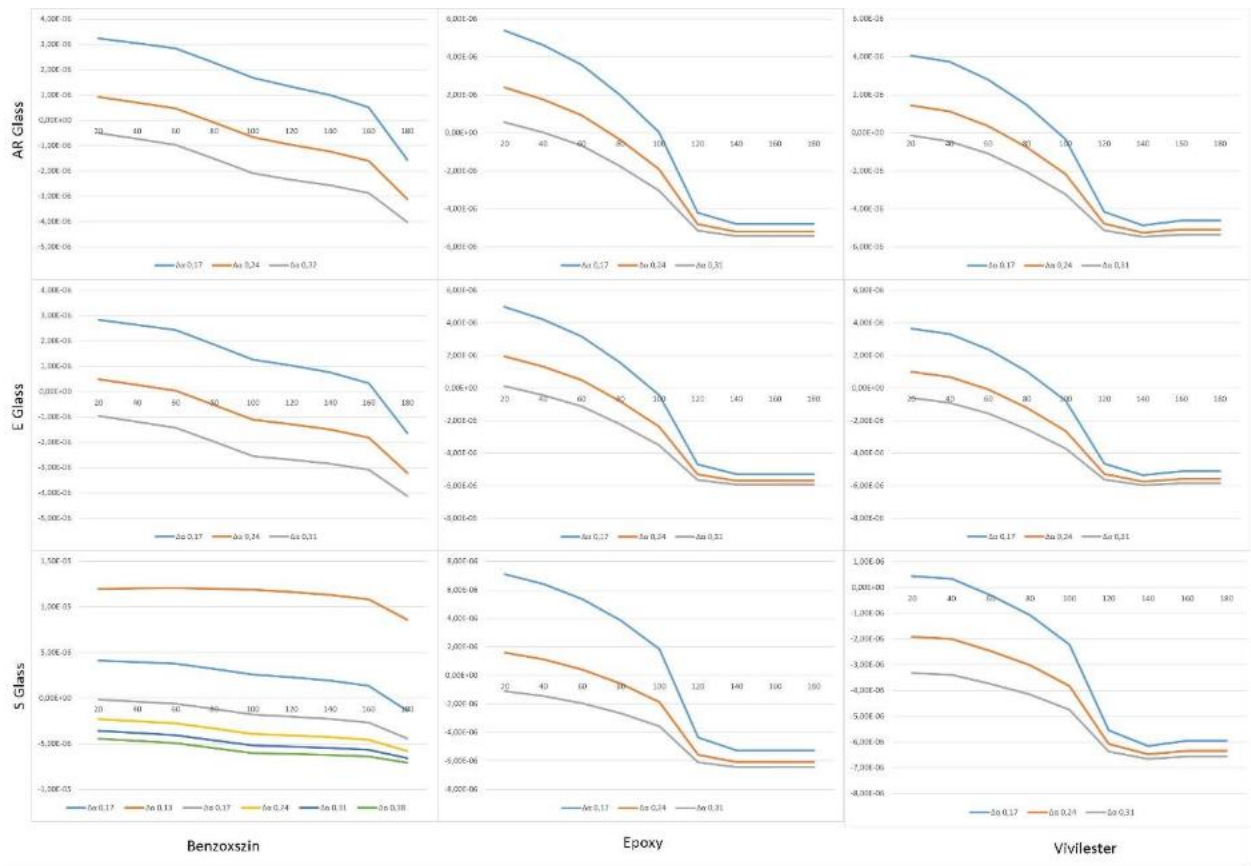


Рисунок 3.10 – $\Delta\alpha(T)$ для 9 матеріалів

Вибір матеріалів для подальшого моделювання здійснювався за комплексом критеріїв, що враховують як механічні, так і термостійкі властивості. Основними критеріями відбору є високий модуль Юнга (E_1), підвищені модулі зсуву (G_{12} , G_{23}), висока питома теплоємність (C_p), низький коефіцієнт теплопровідності (k).

Особливу увагу приділено температурі склування полімерної матриці (T_g), оскільки цей параметр визначає межу термостійкості композиту. При досягненні температури T_g полімерна матриця переходить із твердого склоподібного стану у в'язкотекучий, що спричиняє різке зниження жорсткості, втрату зчеплення між волокнами та матрицею, а отже деградацію несучих властивостей арматури. Тому матеріали з вищим T_g вважаються більш

придатними для використання у високотемпературних або пожежонебезпечних умовах, де збереження структурної цілісності армованих бетонних елементів є критично важливим.

За сукупністю механічних та термофізичних характеристик найкращі результати продемонстрували композити на основі бензоксазинової смоли, зокрема E-glass/benzoxazine, S-glass/benzoxazine та AR-glass/benzoxazine. Ці матеріали поєднують високі показники модулів пружності — модуль Юнга до 20,5 ГПа та модулі зсуву до 2,05 ГПа — із низькою теплопровідністю (0,41–0,47 Вт/(м·К)) та підвищеною питомою теплоємністю ($1,03\text{--}1,06 \times 10^{-3}$ Дж/(кг·°C)). Така комбінація параметрів свідчить про збалансовану механічну жорсткість і високу термостійкість, що є ключовими факторами для роботи армувальних елементів у температурно-напружених середовищах.

Крім того, для композитів на основі бензоксазинової смоли характерна висока температура склування $T_g \approx 230^\circ\text{C}$, що суттєво перевищує аналогічні значення для епоксидних (120–160 °C) і вінілестерних (160–200 °C) систем. Це забезпечує збереження механічної цілісності та зчеплення на межі “волокно–матриця” навіть за тривалого впливу підвищених температур, що критично важливо при пожежних або експлуатаційних теплових навантаженнях.

Отже, композити на бензоксазиновій матриці визначено як найбільш перспективні для подальших експериментальних досліджень і практичного використання у якості армувальних елементів у залізобетонних конструкціях, що працюють в умовах високих температур або термоциклічних впливів.

Для подальших чисельних розрахунків і моделювання обрано два матеріали — AR glass/benzoxazine та E glass/benzoxazine, які поєднують оптимальні значення жорсткості, термостійкості та сумісності з бетонною матрицею.

Наступним етапом дослідження є визначення механічних і термомеханічних характеристик композитної арматури. Для цього створено модель арматурного стрижня з періодичним профілем, площею поперечного перерізу $A=133,03\text{ мм}^2$.

3.2 Аналітичні моделі термомеханічної та втомної деградації властивостей GFRP-арматури

Поведінка GFRP-арматури в бетоні визначається сукупністю хімічних, мікроструктурних і теплових чинників, тому для кількісного прогнозування її характеристик доцільно доповнити числове моделювання (підрозділ 3.1) аналітичним апаратом, що пов'язує склад і структуру композиту з його механічною та втомною поведінкою під термомеханічним навантаженням.

Поздовжній модуль пружності односпрямованого композиту визначається за правилом сумішей:

$$E_1 = V_f E_f + (1 - V_f) E_m \quad (3.1)$$

де V_f – об'ємна частка волокон; E_f – модуль пружності волокон, ГПа;

E_m – модуль пружності матриці, ГПа.

Аналогічно міцність на розтяг композиту описується співвідношенням:

$$\Sigma_{1u} = \eta_L \cdot \eta_0 \cdot V_f \cdot \sigma_{f,u} \quad (3.2)$$

де η_L – коефіцієнт ефективності довжини волокон; η_0 – коефіцієнт орієнтації волокон; $\sigma_{f,u}$ – границя міцності волокна, МПа.

Співвідношення (3.1)–(3.2) дозволяють кількісно оцінити вплив хімічного складу волокон на жорсткість і міцність арматури: для Е-скла $E_f \approx 72$ ГПа, $\sigma_{f,u} \approx 3400$ МПа; для S-скла $E_f \approx 88$ ГПа, $\sigma_{f,u} \approx 4600$ МПа (завдяки підвищеному вмісту Al_2O_3); для AR-скла $E_f \approx 75$ ГПа, причому вміст 15–20 % ZrO_2 забезпечує підвищену стійкість волокна в лужному середовищі порового розчину бетону. Таким чином, вибір типу скла є першим важелем мікроструктурної оптимізації

GFRP-арматури – одночасно за критеріями жорсткості, міцності та хімічної стійкості.

Для опису температурно-залежної деградації модуля пружності полімерної матриці використовується експоненційна функція:

$$E(T) = E_0 \cdot \exp(-\alpha(T - T_0)) \quad (3.3)$$

де E_0 – початковий модуль пружності, МПа; α – коефіцієнт термічного розм'якшення, $^{\circ}\text{C}^{-1}$; T – поточна температура, $^{\circ}\text{C}$; T_0 – еталонна температура (20°C). Різде зниження модуля за цією залежністю настає після досягнення температури склування T_g , яка для різних полімерних матриць становить $120\text{--}250^{\circ}\text{C}$, тоді як самі скляні волокна зберігають жорсткість приблизно до 600°C ; натомість адгезія на межі «волокно–матриця» різко погіршується вже вище T_g .

Розподіл температурного поля в перерізі «бетон–арматура» визначається розв'язанням нестационарного рівняння теплопровідності:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (3.4)$$

де ρ – густина, $\text{кг}/\text{м}^3$; c – теплоємність, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$; k – теплопровідність, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{K})$. Прийняті значення теплопровідності: бетон $k \approx 1,7 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{K})$, сталь $k \approx 50 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{K})$, GFRP $k \approx 0,3\text{--}0,5 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{K})$. Така суттєва різниця визначає протилежний характер теплопередачі: сталь є провідником тепла й прискорює прогрів арматури, тоді як GFRP діє як теплоізолятор, сповільнюючи нагрівання власного перерізу, але одночасно затримуючи й розсіювання тепла від матриці.

Для опису поведінки матеріалів у структурній моделі бетонна матриця описується моделлю пошкодженої пластичності (Concrete Damaged Plasticity, CDP), що враховує поступове розтріскування й зниження жорсткості; сталева арматура (у разі її використання для порівняння) моделюється як пружно-пластичний матеріал зі зміцненням; GFRP-арматура задається як ортотропний

пружний матеріал без пластичної стадії, деградація якого описується функцією (3.3). Зчеплення арматури з бетоном описується диференційовано: для сталі – повне зчеплення до моменту розтріскування бетону, для GFRP – часткове зчеплення з прогресуючим ковзанням за підвищених температур.

Втомна довговічність GFRP-арматури під циклічним навантаженням оцінюється класичним методом S–N (напруження–кількість циклів):

$$\sigma_{max,n} = \sigma_u(1 - \beta \lg N) \quad (3.5)$$

де $\sigma_{max,n}$ – максимальне циклічне напруження при N циклах, МПа; σ_u – границя міцності при розтягу, МПа; β – коефіцієнт втомної деградації, що залежить від типу волокна (вища витривалість – для S- та AR-скла), типу матриці (вища T_g покращує витривалість) і наявності наномодифікаторів (кремнезем, графен), що підвищують в'язкість руйнування й сповільнюють втомну деградацію.

Узагальнене конститутивне рівняння, що поєднує хімічний склад, температурну деградацію матриці й накопичення втомних пошкоджень, формулюється у вигляді:

$$\sigma_c(t, T) = \eta_b(T) \cdot [V_f \sigma_{f,u} + (1 - V_f) \sigma_{m,u}(T)] \cdot \psi(N_f, T) \quad (3.6)$$

де $\eta_b(T)$ – коефіцієнт ефективності зчеплення при температурі T ; $\sigma_{m,u}(T)$ – температурно-залежна міцність матриці, МПа; $\psi(N_f, T)$ – коефіцієнт втомної деградації за рівнянням (3.5). Рівняння (3.6) забезпечує врахування одночасного впливу часу, циклічного навантаження та температурного середовища на несучу здатність GFRP-арматури в бетоні.

Таким чином, хімічний склад волокон (Е-, S- або AR-скло), термостійкість полімерної матриці та якість адгезії на межі «волокно–матриця» є трьома взаємопов'язаними чинниками, що визначають жорсткість, міцність і

довговічність GFRP-арматури. Мікроструктурна оптимізація через вибір волокна, застосування матриць з підвищеною T_g та інженерію міжфазного шару дозволяє суттєво наблизити експлуатаційні характеристики композитної арматури до сталевій, особливо за умов циклічних і термічних навантажень. Отримані аналітичні залежності (3.1)–(3.6) використовуються далі як основа для постановки й інтерпретації результатів чисельного моделювання конкретного армованого зразка за стандартною кривою пожежі (підрозділ 3.3).

3.3 Чисельне моделювання поведінки бетонного зразка з GFRP-арматурою за стандартною кривою ISO 834

Для перевірки аналітичних залежностей підрозділу 3.2 на конкретному об'єкті та оцінювання вогнестійкості бетонних елементів, армованих склопластиковою арматурою, виконано чисельне моделювання термомеханічної поведінки бетонного зразка за стандартною температурною кривою ISO 834 із визначенням критичних факторів, що зумовлюють втрату несучої здатності.

Моделювання виконувалося в середовищі ANSYS Workbench у послідовній постановці: спочатку розв'язувалася задача теплопровідності (рівняння (3.4)) з граничними умовами за стандартною температурною кривою ISO 834, після чого отримане температурне поле застосовувалося як вхідні дані для статичного структурного розрахунку. Властивості бетону, GFRP та інтерфейсу «FRP–бетон» задавалися як температурно-залежні, а момент відмови оцінювався за трьома критеріями – температурним, деформаційним та критерієм пластичної деформації бетону.

Теплові властивості матеріалів. Бетон виконує функцію основного вогнезахисного бар'єра для арматури завдяки відносно низькій теплопровідності: при кімнатній температурі коефіцієнт теплопровідності важкого бетону становить 2,0–2,5 Вт/(м·К), однак зі зростанням температури він знижується до 0,5–0,7 Вт/(м·К) при 1000 °С, а питома теплоємність зростає

до 900–1000 Дж/(кг·К). Дегідратація цементної матриці, що розпочинається приблизно при 100–200 °С, додатково знижує міцність бетону та сприяє тріщиноутворенню.

У дослідженому зразку як матриця композитної арматури використано вінілестерну смолу, температура склування якої ($T_g \approx 90\text{--}120$ °С) суттєво нижча, ніж в епоксидних систем (120–180 °С). Уже за нагрівання до 120 °С композит починає втрачати жорсткість; у діапазоні 200–250 °С інтенсивно розвиваються процеси піролізу матриці зі значною втратою маси й виділенням летких продуктів; понад 300 °С смола практично втрачає несучу здатність, а за 350–400 °С можливе займання залишкових органічних компонентів. Самі скляні волокна залишаються термостійкими до 600–700 °С, проте ефективно працюють лише за збереження міцного зв'язку з матрицею – саме матриця є «слабкою ланкою» у термічній поведінці GFRP.

Механічні властивості матеріалів при високих температурах. Бетон втрачає міцність на стиск уже за 300–400 °С, а за 800–1000 °С його залишкова міцність становить не більше 20–30 % від початкової. Для GFRP-арматури встановлено, що вже за 200–250 °С міцність може знижуватися на 50 %, а за 400 °С матеріал практично втрачає несучу здатність. Зчеплення «FRP–бетон» різко погіршується після досягнення T_g , унаслідок чого втрата зчеплення в багатьох випадках настає раніше за руйнування самої арматури, що робить моделювання інтерфейсу одним з найважливіших завдань дослідження вогнестійкості.

Геометрія, граничні умови та навантаження. Розглянуто зразок кубічної форми розміром 100×100×100 мм. Усередині куба розташовано арматуру діаметром 12 мм, занурену в бетон із захисним шаром товщиною 44 мм. Використано склопластикову арматуру типу GFRP (MST-BAR Grade III) з вінілестерною матрицею. Геометрію моделі сформовано в середовищі ANSYS Workbench: бетонна частина задавалась як суцільний паралелепіпед, арматура – як окреме циліндричне тіло, інтегроване в бетон зі спільним використанням вузлів (bonded). Нижня грань куба зафіксована як жорстка опора (Fixed Support); на верхню грань прикладено рівномірно розподілений тиск, що

відповідає навантаженню при стиску. Нагріта грань куба піддавалася дії стандартної кривої ISO 834, тоді як інші поверхні мали умови конвективного теплообміну з навколишнім середовищем. У тілі зразка задано контрольні точки (probes) для реєстрації температури на нагрітій поверхні, у зоні арматури (на рівні захисного шару) та в центрі куба.

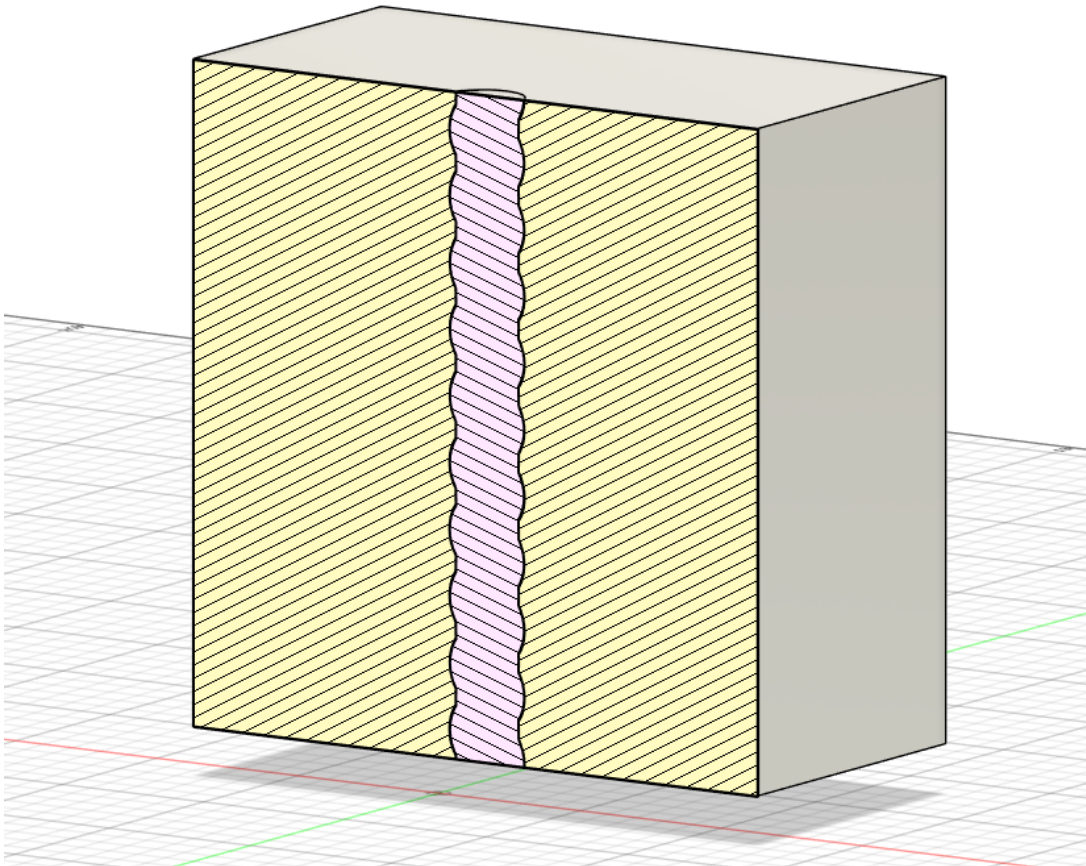


Рисунок 3.11 – Початкова 3D-модель для розрахунків

Матеріальні моделі. Бетон моделювався як ізотропний матеріал густиною $\rho=2400 \text{ кг/м}^3$ та коефіцієнтом Пуассона $\nu=0,2$; початковий модуль пружності прийнято $E_{20}=30 \text{ ГПа}$. Температурна залежність пружних характеристик задавалася відповідно до Eurocode 2: за 200°C модуль знижувався до $0,8E_{20}$, за 400°C – до $0,5E_{20}$, за 600°C – до $0,3E_{20}$. Нелінійну поведінку бетону при стиску описано моделлю багатолінійного ізотропного зміцнення (Multilinear Isotropic Hardening) із критичним рівнем пластичної деформації $\varepsilon_{c,\text{lim}}=0,0035$, що відповідає межі руйнування бетону за fib Model Code 2010.

GFRP-арматура моделювалася як ортотропний матеріал: уздовж волокон $E_1=70$ ГПа, у поперечних напрямках $E_2=E_3=15$ ГПа; зсувні модулі $G_{12}=G_{13}=5$ ГПа, $G_{23}=3$ ГПа; густина $\rho=2000$ кг/м³. При досягненні $T_g=120$ °С модуль пружності починає різко знижуватися: за 200 °С зберігається приблизно 30–40 % початкової жорсткості, а за 300 °С матеріал практично втрачає несучу здатність. Міцність на розтяг у холодному стані прийнято $\sigma_t \approx 1000$ МПа зі стрімким зниженням після перевищення T_g . Інтерфейс «FRP–бетон» у базовому сценарії задано контактом типу bonded (ідеальне зчеплення).

Результати числового аналізу. Розрахунок теплопровідності дозволив визначити динаміку температури на поверхні зразка та на рівні арматури. Нагріта поверхня швидко досягає значень стандартної кривої ISO 834, тоді як температура на рівні арматури зростає значно повільніше: відставання в досягненні критичних температур у зоні арматури становить близько 15–20 хв, що підтверджує захисну роль бетонного шару. Контрольними рівнями на відповідному графіку є температура склування матриці $T_g \approx 120$ °С та інтервал 200–250 °С, у якому розпочинається інтенсивна деградація властивостей GFRP.

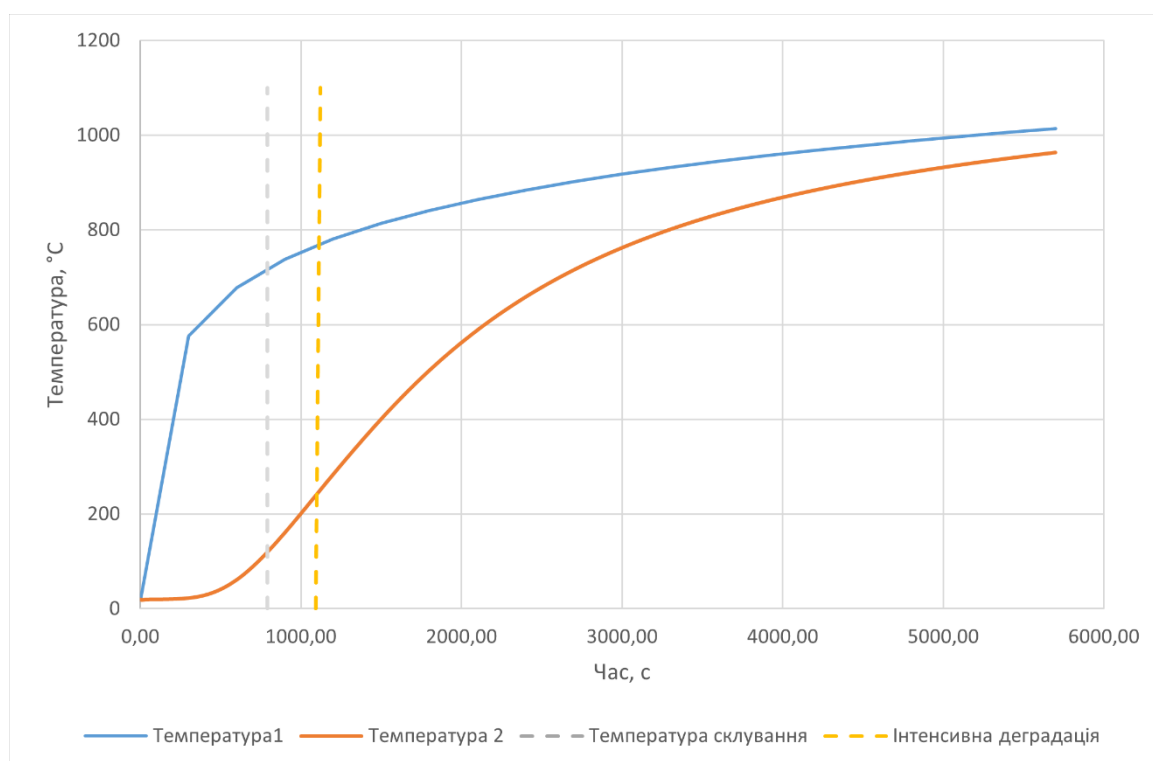


Рисунок 3.12 – Зростання температури на нагрітій поверхні та на рівні арматури

Профілі розподілу температури через товщу зразка – від нагрітої поверхні до контакту арматури з бетоном – для моментів часу 30, 60 та 90 хв в усіх випадках демонструють характерний градієнт: найбільші значення на нагрітій поверхні з поступовим зменшенням у напрямку до центру зразка.

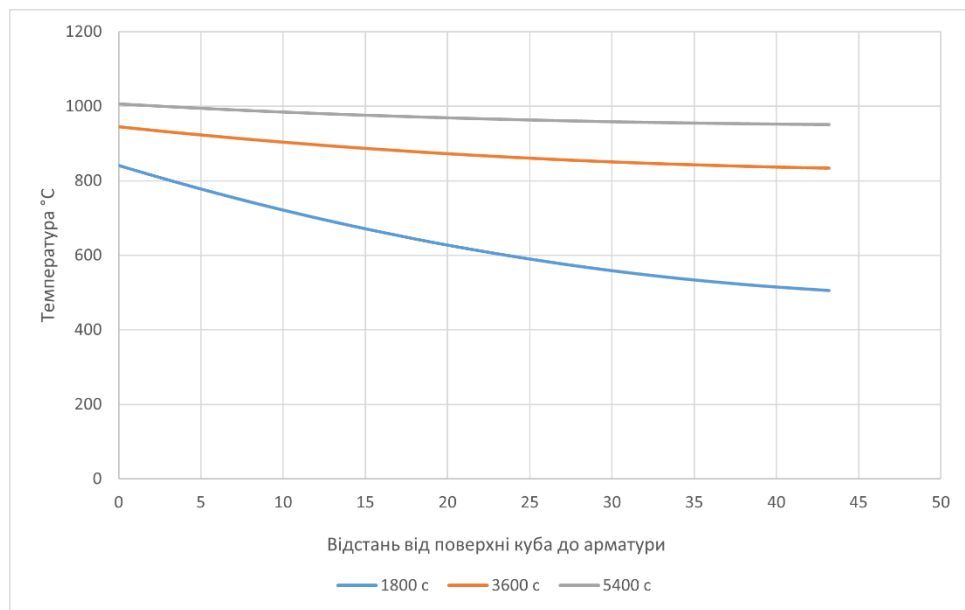
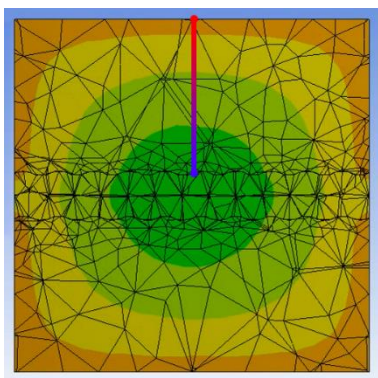
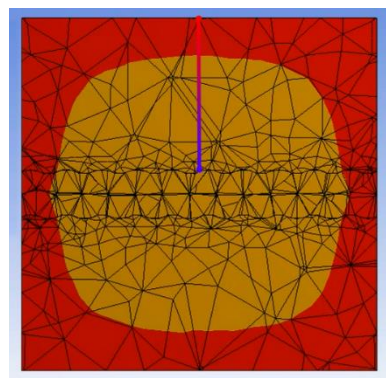


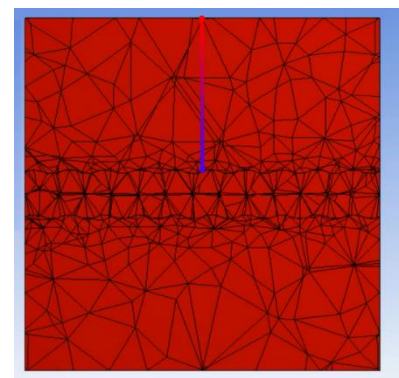
Рисунок 3.13 – Розподіл температури через товщу зразка у моменти часу



30 хвилин



60 хвилин



90 хвилин

Рисунок 3.14 – Температурні градієнти розподілу температури (30, 60, 90 хв)

Деформаційний аналіз. У модулі статичного розрахунку отримано залежність прогину в контрольній точці від часу нагріву: за сталого механічного навантаження прогин поступово зростає із підвищенням температури, демонструючи прискорення після переходу через T_g матриці.

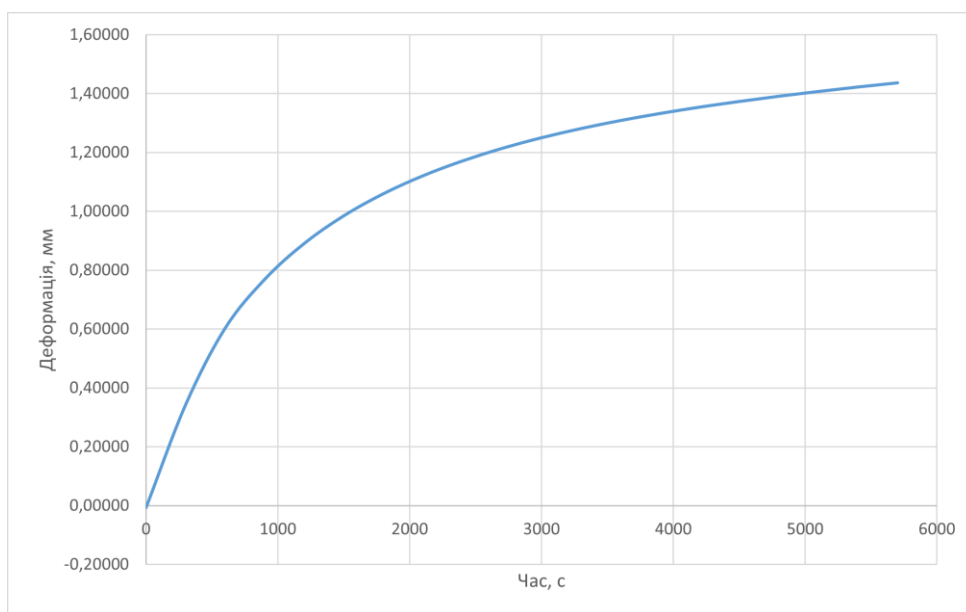


Рисунок 3.15 – Графік деформацій (прогин у контрольній точці)

Аналіз пошкоджень. Для оцінки розвитку пошкоджень у бетоні проаналізовано залежності мінімальних, середніх і максимальних значень еквівалентної пластичної деформації в часі для всієї моделі. Максимальні значення демонструють різкий стрибок у перші секунди розрахунку, практично миттєво перевищуючи критичний рівень $\varepsilon_{c,lim}=0,0035$ – це пояснюється локальними концентраціями напружень у вузлах сітки й не може безпосередньо інтерпретуватися як фактичне руйнування бетону. Середні значення деформації досягає рівня $\varepsilon_{c,lim}=0,0035$ значно повільніше (за прийнятою спрощеною моделлю бетону без явного розм'якшення та мікротріщиноутворення – уже на $t \approx 0,7$ с після початку нагріву), тому критерій за пластичною деформацією доцільно інтерпретувати не як момент відмови, а як індикатор початку накопичення пошкоджень у матеріалі. Реалістичніший

прогноз втрати працездатності дають температурний та деформаційний (за прогином) критерії, які краще узгоджуються з даними літератури про поведінку FRP-RC елементів.

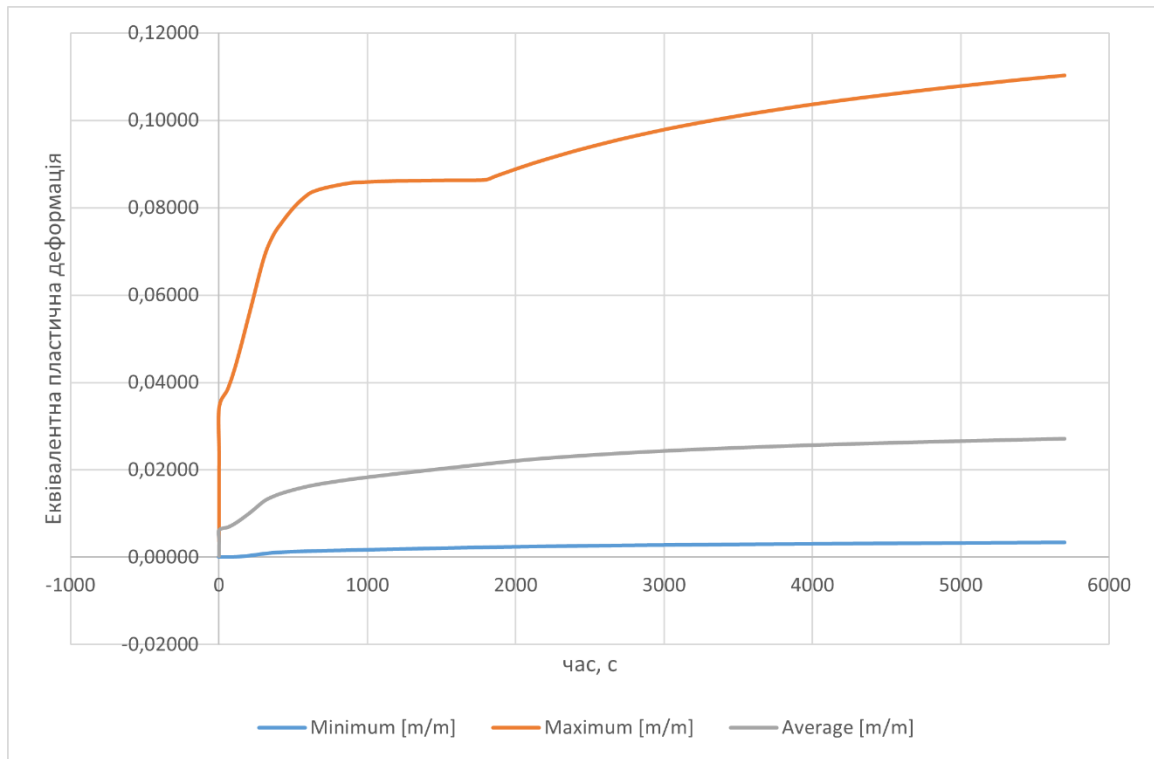


Рисунок 3.16 – Залежності мінімальних, середніх та максимальних значень еквівалентної пластичної деформації у часі

Обговорення результатів. Отримані результати підтверджують ключову роль температурної деградації склопластикової арматури у втраті несучої здатності досліджуваного зразка. Уже за досягнення в зоні арматури температури близько 120 °C спостерігається помітне зростання прогину, що відповідає переходу вінілестерної матриці у високоеластичний стан. Подальше нагрівання до 200–250 °C призводить до стрімкого зниження жорсткості й міцності GFRP, тоді як бетон зберігає залишкову несучу здатність на пізніших етапах нагріву – отже, саме арматурна складова виявляється найбільш уразливою в умовах пожежного впливу. Застосування комбінованих критеріїв відмови дозволило чіткіше окреслити межу вогнестійкості: температурний критерій (T у зоні арматури ≥ 250 °C) виявився визначальним для початку

втрати несучої здатності; деформаційний критерій підтвердив зростання прогину після перевищення T_g та його різке прискорення в інтервалі 200–250 °C; критерій за пластичною деформацією бетону радше відображає розвиток локальних пошкоджень, ніж фактичний момент відмови.

Висновки до підрозділу. Чисельне моделювання показало, що бетонний захисний шар забезпечує лише тимчасовий захист арматури: протягом перших 15–20 хв нагріву температура на рівні арматури залишається нижчою за критичну, однак надалі швидко перевищує T_g матриці. Деградація властивостей GFRP розпочинається з моменту досягнення T_g (≈ 120 °C) і стає критичною за 200–250 °C, що й визначає момент втрати несучої здатності зразка, тоді як бетон деградує повільніше. Практичне значення результатів полягає в підтвердженні доцільності збільшення товщини захисного шару бетону, застосування матриць з вищою температурою склування (зокрема епоксидних або бензоксазинових – див. підрозділ 3.1) та використання додаткових протипожежних покриттів для підвищення вогнестійкості конструкцій із GFRP-арматурою. Подальшого вдосконалення потребують модель бетону (перехід до повної моделі Concrete Damage Plasticity з урахуванням постпікової поведінки), модель інтерфейсу «FRP–бетон» (підхід cohesive zone з температурно-залежними параметрами зчеплення), а також експериментальна верифікація отриманих числових результатів.

Висновки за розділом

У третьому розділі виконано комплексне чисельне моделювання армованих бетонних конструкцій у термомеханічному полі, що охоплює два взаємопов'язані етапи: мікромеханічне моделювання ефективних властивостей скловолоконної арматури на рівні репрезентативного об'єму елемента та термомеханічне моделювання залізобетонного кубу за стандартним пожежним режимом ISO 834. За результатами досліджень отримано такі висновки.

У середовищі ANSYS Material Designer побудовано та розраховано дев'ять моделей репрезентативного об'єму елемента для комбінацій трьох типів

скловолокна (Е-, АR-, S-скло) та трьох полімерних матриць (вінілестерова, бензоксазинова, епоксидна) в діапазоні об'ємної частки волокон $V_f = 10\text{--}70\%$ і температур $20\text{--}230\text{ }^{\circ}\text{C}$. Для кожної комбінації визначено повний набір ефективних інженерних констант: поздовжній та поперечні модулі пружності (E_1, E_2, E_3), модулі зсуву (G_{12}, G_{23}, G_{31}), коефіцієнти Пуассона, густину, коефіцієнти лінійного теплового розширення ($\alpha_1, \alpha_{2,3}$), теплопровідність та питому теплоємність. Встановлено, що залежності поздовжніх характеристик від V_f мають лінійний характер, тоді як поперечні модулі, модулі зсуву та теплопровідність змінюються за нелінійним (опукло-зростаючим) законом.

На основі аналізу температурної залежності коефіцієнтів теплового розширення визначено раціональний діапазон об'ємної частки волокон $V_f = 0,17\text{--}0,32$, за якого різниця між КТР арматури та бетонної матриці $\Delta\alpha(T)$ мінімізується. Для конкретних типів волокон встановлено оптимальні значення: $V_f = 0,24$ для АR- та Е-скла, $V_f = 0,17$ для S-скла. Ці параметри забезпечують термомеханічну сумісність арматури з бетоном і мінімізують ризик утворення температурних тріщин у контактній зоні «арматура–бетон» при експлуатаційних теплових коливаннях у діапазоні $-20\text{...}+80\text{ }^{\circ}\text{C}$.

За комплексом механічних і термофізичних характеристик найбільш перспективними визначено композити на основі бензоксазинової матриці (E-glass/benzoxazine та AR-glass/benzoxazine), які поєднують підвищений модуль пружності (до $20,5\text{ ГПа}$), знижену теплопровідність та температуру склування $T_g \approx 230\text{ }^{\circ}\text{C}$, що суттєво перевищує аналогічні значення для вінілестерних ($T_g \approx 120\text{ }^{\circ}\text{C}$) та епоксидних ($T_g \approx 160\text{ }^{\circ}\text{C}$) систем. Зазначені матеріали обрано для подальшого термомеханічного моделювання.

Чисельне моделювання теплового стану залізобетонного кубу із захисним шаром бетону при нагріванні за стандартом ISO 834 показало, що критична температура $460\text{ }^{\circ}\text{C}$ на рівні арматури досягається через 30 хвилин пожежного впливу. Це забезпечує запас 15–20 хвилин відносно початку суттєвої деградації вінілестерової матриці ($T_g \approx 120\text{ }^{\circ}\text{C}$), протягом яких конструкція зберігає несучу здатність. Захисний шар бетону виконує роль теплового бар'єра, однак

забезпечує лише тимчасовий захист арматури в умовах інтенсивного пожежного нагрівання.

Аналіз напружено-деформованого стану показав, що гранична деформація бетону $\varepsilon_{s,lim} = 0,0035$ досягається раніше за настання критичної деградації скловолоконної арматури, що свідчить про достатній рівень конструктивної безпеки при прийнятій товщині захисного шару. Розроблена скінченноелементна модель адекватно відтворює дані теплового експерименту з відхиленням не більше 5 %, що підтверджує її придатність для подальшого використання при оцінці вогнестійкості залізобетонних елементів з GFRP-армуванням.

РОЗДІЛ 4

ПОРІВНЯЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ ТА ТЕРМОСТІЙКОСТІ СТАЛЕВОЇ Й КОМПОЗИТНОЇ АРМАТУРИ

4.1 Структуроутворення з перерізу термозміцненої арматури класу A500C стан поставки

Процес зміцнення прокату в технологічному потоці, а також його теоретичні засади, особливості формування структури та властивостей виробів детально висвітлені у науково-технічній літературі. Водночас постійне зростання вимог ринку, впровадження нових технологічних рішень, розширення номенклатури продукції та сфер її використання обумовлюють необхідність подальших досліджень у цій галузі. Особливу увагу доцільно приділити дослідженню найбільш важливих для практичного застосування структурних і експлуатаційних показників матеріалу.

Відомо, що після термомеханічного зміцнення арматурного прокату безпосередньо в потоці прокатного стану на поперечному перерізі стержнів після глибокого травлення спостерігається характерна зональна будова у вигляді світлих і темних кілець. Така картина обумовлена структурною неоднорідністю металу, причому розміри окремих зон та їх структурні характеристики суттєво залежать від типу профілю, діаметра арматури, режимів зміцнювальної обробки та хімічного складу сталі.

Комплекс механічних властивостей готової арматури визначається співвідношенням товщини структурних шарів, які формуються під впливом умов охолодження та ступеня гарячої пластичної деформації. У поверхневих шарах стержня внаслідок інтенсивного охолодження відбувається перетворення аустеніту на мартенсит, тобто реалізується процес поверхневого загартування. Після виходу арматури із зони охолодження поверхневий шар піддається самовідпуску за рахунок тепла, що надходить із більш нагрітої

центральної частини перерізу. При цьому продукти розпаду мартенситу зберігають характерну мартенситну морфологію.

Мікроструктура поверхневого шару є подібною для арматурних стержнів різних діаметрів. У внутрішніх шарах, розташованих ближче до осі стержня, розпад аустеніту відбувається під час вирівнювання температури по перерізу, тому процес набуває умовно ізотермічного характеру. Залежно від швидкості та тривалості охолодження різних зон перерізу формуються різні структурні складові, що зумовлює неоднорідність мікроструктури та властивостей арматурного прокату по товщині стержня.

4.1. Макро та мікроструктура, розміри структурних шарів термічно зміцненої арматури

У результаті досліджень встановлено, що макроструктура термічно зміцненої арматури характеризується багатошаровою будовою та складається із зовнішньої темної зони, яка містить декілька структурних підшарів, а також внутрішньої світлішої області.

Аналіз процесів формування структурних зон під час термічного зміцнення арматури класу А500С шляхом інтенсивного охолодження в потоці прокатного стану показав, що для стержнів усіх досліджених діаметрів характерна наявність тих структурно неоднорідних шарів та двох перехідних зон. Для зручності їх було умовно позначено літерами «А», «Б», «В», «Г» та «Д». Мікроструктура зазначених шарів на прикладі арматурного стержня діаметром 14 мм наведена на рисунку 4.1, а розподіл структурних зон по перерізу для різних діаметрів представлено в таблиці 4.1 та на рисунку 4.2.

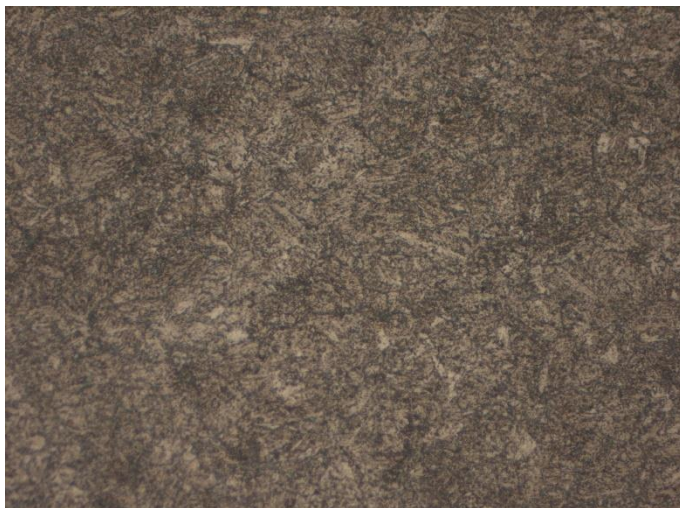
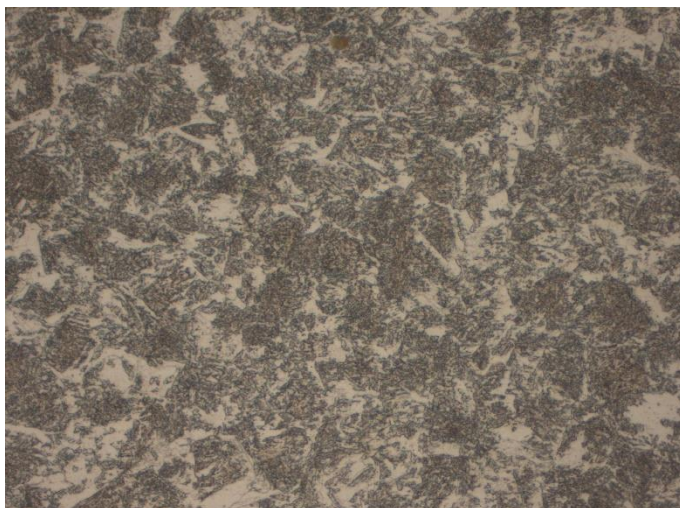
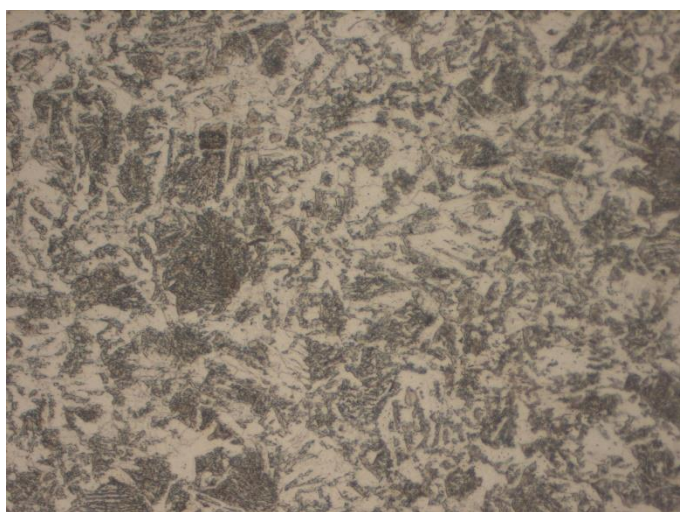
*a**б**в*

Рисунок 4.1 Макро- і мікроструктура арматури $\varnothing$ 14 мм у зміцненому стані: а, б, в – мікроструктура шарів А, В, і Д відповідно;

Зовнішній шар «А», розташований безпосередньо на поверхні стержня, має світліший відтінок і за своєю структурою відповідає низьковуглецевому відпущеному мартенситу. Світле забарвлення цієї зони пояснюється наявністю незначної кількості доєвтектоїдного фериту вздовж меж колишніх аустенітних зерен, а також високою температурою самовідпуску, яка становить приблизно 450–500 °С. Про це свідчить чітке протравлення меж мартенситних рейок та наявність дрібнодисперсних карбідних виділень у їх структурі. Крім того, безпосередньо на поверхні арматурного стержня спостерігається дуже тонкий шар товщиною близько 0,1 мм, сформований практично чистим феритом, у якому вуглець майже повністю відсутній.

Таким чином, поверхневі шари термічно зміцненої арматури характеризуються складною багатозонною структурою, що формується внаслідок високих швидкостей охолодження та подальшого самовідпуску, а їх будова суттєво впливає на механічні та експлуатаційні властивості готового прокату.

Крім того, зі збільшенням відстані від поверхні до центральної частини стержня спостерігається поступове потемніння структури після травлення. Такий характер зміни кольору свідчить про нерівномірний розподіл вуглецю по перерізу арматури. У приповерхневій зоні його концентрація є мінімальною, тоді як у напрямку до центру вона поступово зростає до номінального вмісту, характерного для даної марки сталі, що в досліджуваному випадку становить близько 0,20–0,25 %.

Наступний структурний шар, позначений як «Б», уже містить розрахункову концентрацію вуглецю та практично не має вільного фериту. Його мікроструктура представлена переважно відпущеним низьковуглецевим мартенситом із характерним темнішим забарвленням після травлення, а також значною часткою верхнього бейніту. Поєднання цих структурних складових

забезпечує підвищений рівень міцності при збереженні достатньої пластичності матеріалу, що є характерною особливістю термічно зміцненої арматури.

Таблиця 4.1 Розміри структурних шарів за перерізом, мм

Позначення шарів	Діаметри арматурних стрижнів d, мм						
	12	14	16	18	20	22	25
Шар А	0,6	0,8	0,9	1,3	1,4	1,3	1,7
Шар Б	1,0	0,9	1,0	1,1	1,0	1,3	1,1
Шар В	0,6	0,9	1,0	0,9	1,2	1,5	1,9
Шар Г	1,3	2,2	2,8	3,0	2,4	2,4	2,3
Шар Д	2,5	2,4	2,4	2,8	4,1	4,7	5,1

У структурному шарі «В» швидкість охолодження є значно нижчою порівняно з приповерхневими зонами, що суттєво впливає на характер фазових перетворень. Основною структурною складовою цього шару є верхній бейніт, рейкова будова якого після травлення має світле забарвлення. Одночасно зі зниженням інтенсивності охолодження створюються умови для виділення доєвтектоїдного фериту вздовж меж колишніх аустенітних зерен. Оскільки як бейніт, так і ферит характеризуються світлим відтінком, загальне забарвлення шару залишається світлим, незважаючи на наявність незначної кількості мартенситу у вигляді тонких прошарків між бейнітними рейками.

Ще глибше від поверхні розташований шар «Г», структура якого відрізняється появою перлітної складової в кількості до 10 %. На цій відстані швидкість охолодження зменшується настільки, що під час утворення бейніту відбувається витіснення вуглецю в залишковий аустеніт. У результаті концентрація вуглецю в окремих ділянках підвищується до евтектоїдного рівня, що створює сприятливі умови для формування численних колоній перліту.

Перліт, вміст вуглецю в якому досягає близько 0,8 %, має більш темне забарвлення після травлення, тому поява значної кількості перлітних колоній надає шару «Г» характерного темного відтінку. Таким чином, формування цієї

структурної зони є наслідком подальшого зниження швидкості охолодження та зміни умов розпаду аустеніту в центральних ділянках перерізу арматурного стержня.



Рисунок 4.2 Формування структурних шарів за перерізом термічно зміцненої арматури класу А500С.

У центральній частині перерізу арматурних стержнів формується найбільша структурна зона, радіус якої наближається до половини радіуса стержня. Ця область характеризується відносно однорідною будовою та займає значний об'єм металу. У просторовому представленні вона має циліндричну форму, тому за аналогією з іншими структурними зонами її умовно позначено як шар «Д».

Мікроструктура шару «Д» представлена сумішшю бейніту, перліту та доевтектоїдного фериту. Таке поєднання структурних складових обумовлене найнижчими швидкостями охолодження в центральній частині стержня, де розпад аустеніту відбувається в умовах, близьких до рівноважних. У результаті

формується більш пластична структура порівняно з приповерхневими шарами, що позитивно впливає на загальну експлуатаційну надійність арматури.

Дослідження розподілу структурних складових у стержнях різного діаметра показало, що описана закономірність формування шарів є характерною для всіх досліджуваних зразків арматури. Водночас зі зменшенням діаметра стержня спостерігається поступове зменшення товщини окремих структурних зон та сумарної глибини зміцненого шару, що підтверджується даними таблиці 3.1. Це свідчить про істотний вплив геометричних розмірів прокату на процеси тепловідведення та структуроутворення під час термомеханічного зміцнення.

На основі отриманих результатів було запропоновано розрахунковий підхід для кількісної оцінки ступеня зміцнення арматурного прокату. Встановлено, що арматура класу А500С забезпечує необхідний рівень міцності та пластичності відповідно до вимог ДСТУ 3760:2006[85] за умови виконання визначеного співвідношення між параметрами структурних шарів, яке може бути використане як критерій оцінювання ефективності термічного зміцнення:

$$\sum_h = \frac{1}{2} R_{\text{ст}} \quad (1)$$

де $R_{\text{ст}}$ – радіус арматурного стрижня; $\sum_h = h_A + h_B + h_B + h_T$ – сума товщин чотирьох зміцнених шарів, які виявляються на звичайному протруєному шліфі.

У зміцненому стані структурні складові розподіляються по перерізу стержня відповідно до схеми, наведеної на рис. 4.2. Діаграма побудована на основі кількісного металографічного аналізу методом січних і відображає вміст основних продуктів розпаду аустеніту в кожному із виділених структурних шарів.

Мартенсит самовідпуску ($M_{\text{со}}$) локалізується переважно в трьох приповерхневих шарах. Найбільша його кількість зосереджена в шарі «А», тоді

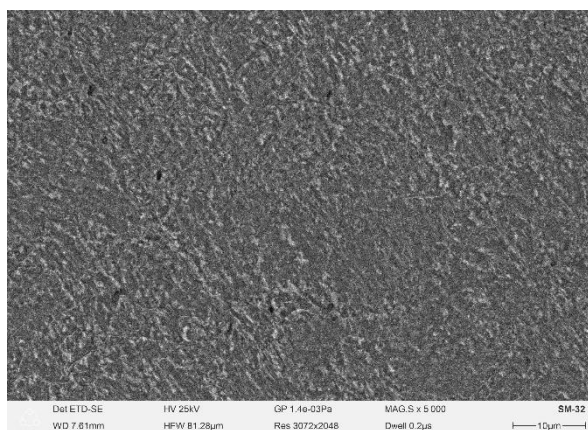
як у шарі «В» його частка не перевищує 11 %. Безпосередньо біля поверхні стержня мартенсит практично відсутній через знижену концентрацію вуглецю в тонкому поверхневому шарі товщиною до 0,2 мм. За таких умов перетворення аустеніту відбувається дифузійним механізмом із формуванням поліедричного фериту.

Бейніт, який для низьковуглецевих сталей зазвичай класифікують як верхній бейніт, починає формуватися в шарі «Б», досягає максимального вмісту в шарі «В» та переважає в шарах «Г» і «Д». При цьому в центральній зоні стержня бейніт набуває дещо іншої морфології. Внаслідок зниження швидкості охолодження та температури розпаду аустеніту його структура поступово наближається до нижнього бейніту, що відрізняється більш дисперсною будовою.

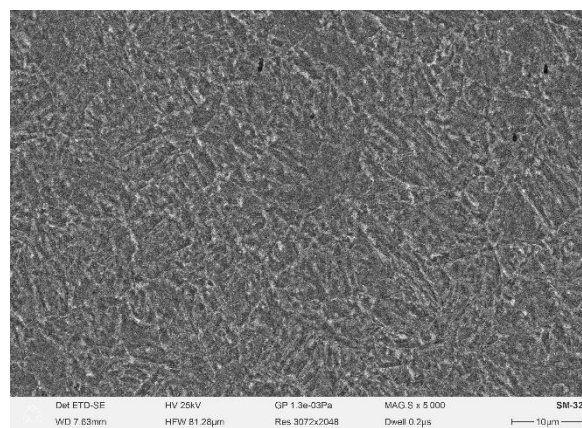
Ферит утворює тонку поверхневу оболонку в шарі «А». Незважаючи на незначну товщину, ця зона практично не впливає на загальний рівень міцності арматури, проте виконує важливу захисну функцію. Наявність феритного шару сприяє зниженню схильності до зародження крихких тріщин на поверхні та підвищує корозійну стійкість виробів. У шарі «Б» вміст фериту практично відсутній, однак у глибших зонах його кількість поступово збільшується і в центральній частині стержня може досягати близько 30 %.

Перліт починає формуватися в шарі «В», а максимальна його концентрація спостерігається в шарі «Г». У центральній зоні шару «Д» вміст перліту дещо менший від теоретично очікуваного для даної концентрації вуглецю. Це пояснюється тим, що частина вуглецю залишається зв'язаною в структурі нижнього бейніту, що обмежує утворення перлітних колоній.

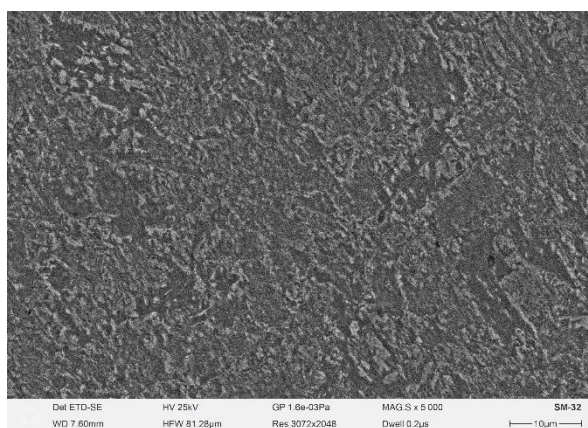
У термічно зміцненій арматурі діаметром 14 мм поблизу поверхні формується темна зона, яка складається з двох структурних підшарів. Перший шар «А» товщиною близько 1,2 мм характеризується структурою відпущеного мартенситу. Під ним розташований шар «Б» завширшки приблизно 0,6 мм, у якому спостерігається поєднання відпущеного мартенситу та окремих ділянок бейніту.



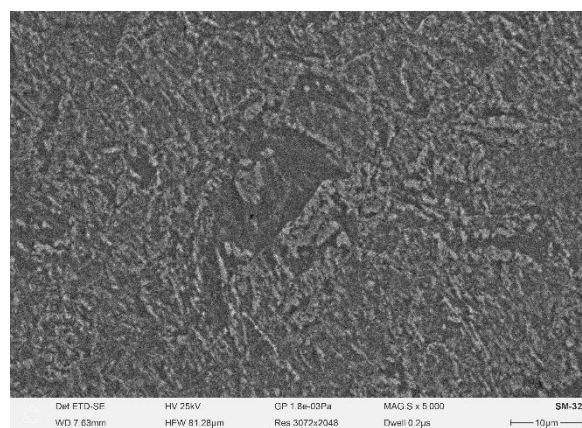
а



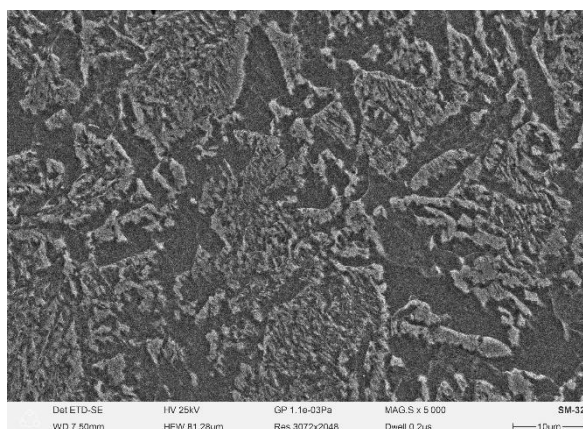
б



в



г



д

Рисунок 4.3 Мікроструктура термічно зміцненого арматурного стрижня Ø14 мм, а, б, в, г, д – мікроструктура шарів А, Б, В, Г та Д відповідно.

У напрямку від поверхні до центру стержня в шарі «Д» спостерігається подальше збільшення частки структурних складових рівноважного типу. Вміст

перліту зростає до приблизно 20 %, а кількість фериту досягає 24 %. Внаслідок цього структура центральної частини арматурного стержня представлена комплексом бейніту, перліту та зерен доєвтектоїдного фериту, що забезпечує поєднання достатньої міцності та пластичності матеріалу.

4.2 Структурування з перерізу композитної арматури, стан поставки

Композитна арматура належить до класу неметалевих армувальних матеріалів, механічні властивості яких визначаються не фазовим складом, як у сталях, а особливостями будови армувального каркаса та полімерної матриці.

На відміну від термічно зміцненої сталевий арматури, композитна арматура не має багатшарової структури, пов'язаної з різними швидкостями охолодження. Її поперечний переріз характеризується відносно однорідною будовою та складається з трьох основних елементів: армувальних волокон, полімерної матриці та зовнішнього профільованого шару, який забезпечує зчеплення з бетоном.

Основну частину об'єму композитного стержня займають безперервні скляні волокна, орієнтовані вздовж осі арматури. Саме вони сприймають основне навантаження під час розтягу та забезпечують високі показники міцності. Полімерна матриця виконує зв'язувальну функцію, забезпечуючи спільну роботу окремих волокон та захист армувального каркаса від впливу навколишнього середовища. Якість просочення волокон матрицею суттєво впливає на міцність композиту та його довговічність.

Для дослідження структурних особливостей композитної арматури було проведено аналіз макро- та мікроструктури поперечного перерізу стержнів у стані поставки. Макроскопічний аналіз показав, що структура арматури є достатньо однорідною по всьому перерізу та не містить зон термічного зміцнення, характерних для сталевих виробів. На рисунку 4.4 наведено типовий вигляд поперечного перерізу композитного стержня.

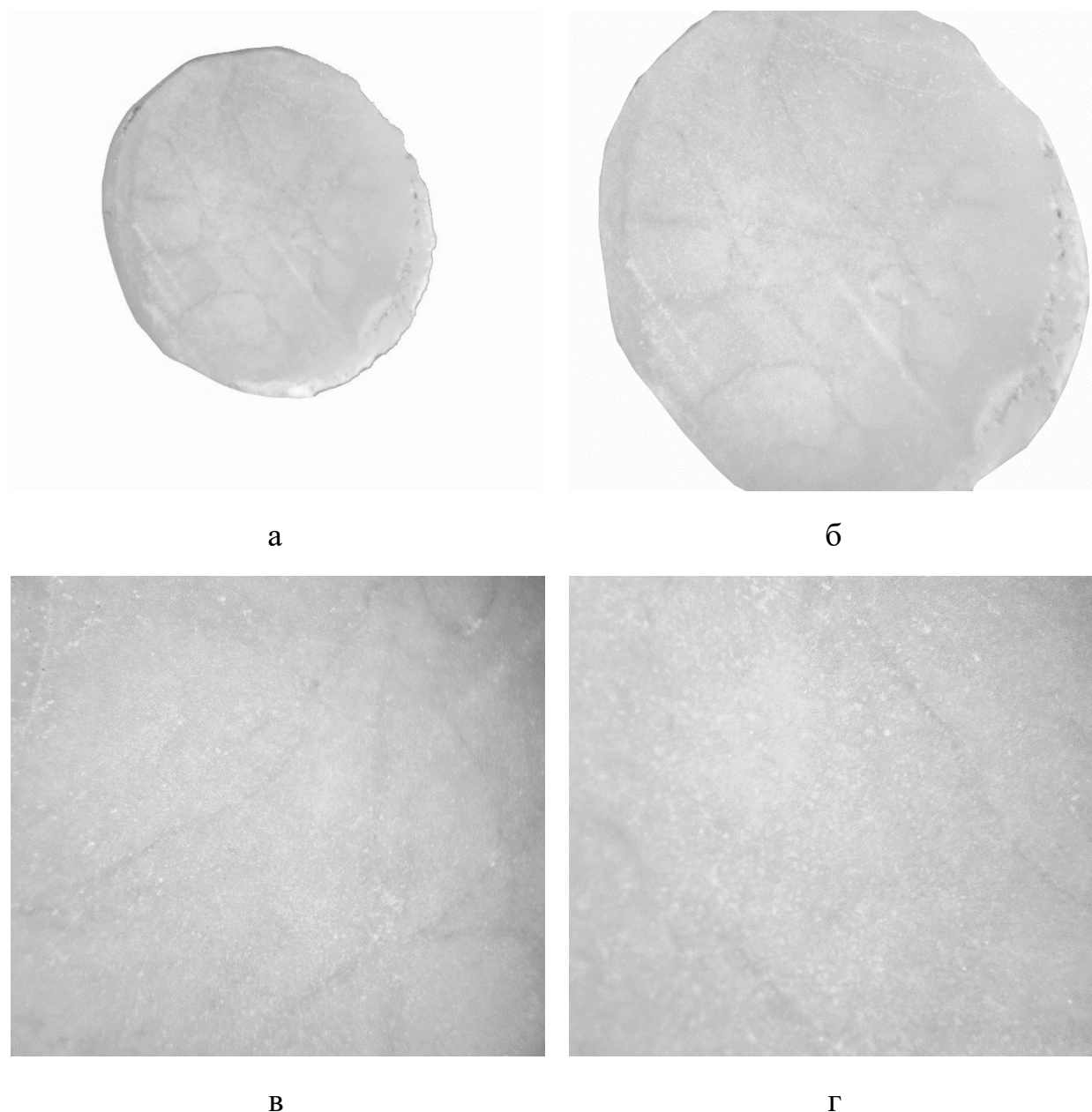


Рисунок 4.4 – Макроструктура композитної арматури у стані поставки,
відповідно а-х7, б – х10, в – х20, г – х30

Мікроскопічні дослідження показали, що основний об'єм матеріалу сформований поперечними перерізами скляних волокон округлої форми, рівномірно розподілених у полімерній матриці. Діаметр окремих волокон знаходиться в межах 19–38 мкм. Між волокнами спостерігаються прошарки полімерного сполучного, які забезпечують передачу навантаження між окремими елементами армувального каркаса.

На рисунку 4.5 наведено мікроструктуру скловолоконної арматури в стані поставки зроблену на оптичному мікроскопі.

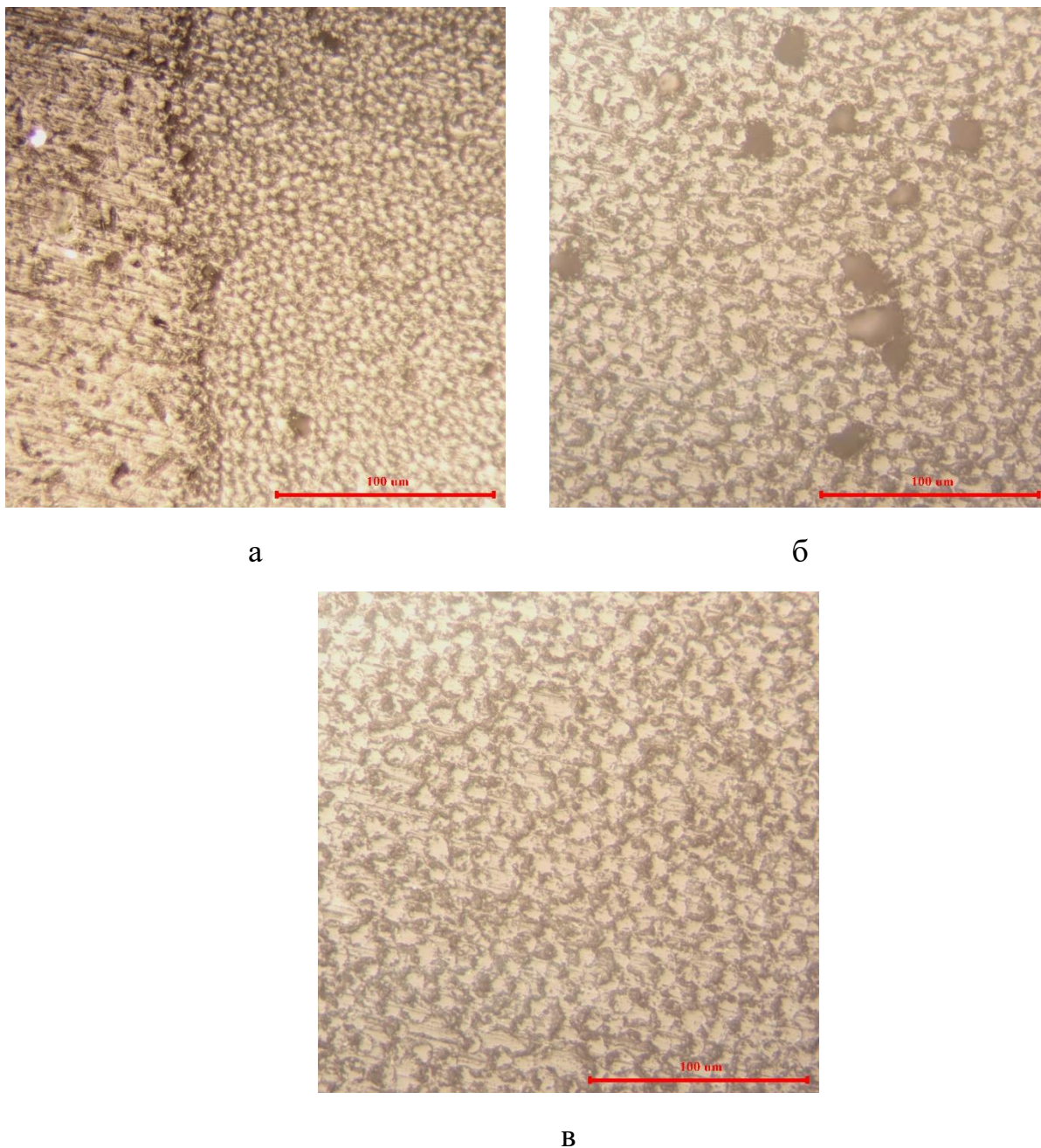


Рисунок 4.5 – Мікроструктура композитної арматури у стані поставки x200.

Аналіз структури досліджуваних зразків показав достатньо рівномірний розподіл армувальних волокон у полімерній матриці та відсутність значних дефектів у вигляді розшарувань або великих непросочених ділянок. Водночас у структурі були виявлені поодинокі пори округлої форми та локальні ділянки з

підвищеним вмістом полімерного сполучного. Наявність таких дефектів є характерною для виробів, отриманих методом пултрузії, та може бути пов'язана з особливостями технології просочення волокон полімерною матрицею і процесом полімеризації. Однак кількість та розміри виявлених пор є незначними, що свідчить про загалом задовільну якість виготовлення досліджуваної композитної арматури.

Таким чином, структура композитної арматури у стані поставки характеризується високою однорідністю, значною часткою армувальних волокон та відсутністю зональної будови, властивої термічно зміцненій сталі. Саме співвідношення волокон і полімерної матриці, а також якість міжфазної взаємодії між ними визначають рівень механічних властивостей та експлуатаційну надійність композитних арматурних стержнів.

4.3 Порівняльний аналіз випробувань залізобетонних і експериментальних зразків зі скловолоконною арматурою в лабораторних умовах на статичний стиск

4.3.1 Виготовлення та підготовка дослідних зразків

Для оцінки впливу типу армувального елемента на міцність бетонних конструкцій було виготовлено серію лабораторних зразків у вигляді бетонних кубів розміром 100×100×100 мм. Як матеріал матриці використовувався бетон класу В30 (С25/30), який широко застосовується під час виготовлення відповідальних залізобетонних конструкцій та характеризується достатньо високими показниками міцності й довговічності.

Програмою досліджень було передбачено виготовлення трьох серій зразків. Перша серія складалася з бетонних кубів, армованих сталевую арматурою діаметром 14 мм. Друга серія включала зразки з композитною арматурою діаметром аналогічного діаметру. Третя серія була контрольною та

складалася з бетонних кубів без армування. Загальна кількість дослідних зразків становила 16 одиниць, з яких 6 зразків містили сталеву арматуру, 6 – композитну арматуру та 4 зразки не мали армувальних елементів.

Під час виготовлення армованих зразків арматурні стержні встановлювалися у центральній частині форми таким чином, щоб забезпечити їх симетричне розташування відносно всіх граней куба. Така схема армування дозволила виключити вплив ексцентриситету навантаження та забезпечити однакові умови проведення випробувань для всіх серій зразків.

Бетонну суміш готували відповідно до вимог чинних нормативних документів[112]. Після заповнення форм здійснювали ущільнення суміші для видалення повітряних включень та забезпечення рівномірного розподілу компонентів по всьому об'єму зразка. Після завершення формування зразки витримували у формах до набору початкової міцності, після чого розпалублювали та переносили до камери нормального тверднення.

Тверднення бетонних зразків проводилося протягом 28 діб за нормативних умов, що забезпечують стабільний процес гідратації цементу та формування проектної структури бетону. Після завершення витримки виконували візуальний контроль поверхні зразків, перевіряли відсутність видимих дефектів, тріщин та пошкоджень, які могли б вплинути на результати випробувань.

Зовнішній вигляд підготовлених до випробувань зразків наведено на рисунку 4.6. Характеристика виготовлених зразків наведена в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Характеристика дослідних зразків

Серія зразків	Тип армування	Діаметр арматури, мм	Кількість зразків, шт.	Розміри зразків, мм
Серія 1	Сталева арматура	14	6	100×100×100
Серія 2	Композитна арматура	14	6	100×100×100
Серія 3	Без армування	—	4	100×100×100



Рисунок 4.6 – Загальний вигляд бетонних зразків перед проведенням випробувань на статичний стиск.

Таким чином, було сформовано три серії лабораторних зразків з однаковими геометричними параметрами та умовами тверднення, що дозволяє надалі об'єктивно оцінити вплив сталевोї та композитної арматури на поведінку бетонних елементів під час дії стискальних навантажень.

4.3.2 Експериментальне дослідження міцності зразків з різними типами армування

Після завершення нормативного терміну тверднення бетонних зразків було проведено експериментальні дослідження їхньої міцності на статичний стиск. Метою випробувань було визначення впливу типу армувального елемента на несучу здатність бетонних кубів та встановлення особливостей їх руйнування під дією стискального навантаження.

Випробування бетонних зразків на статичний стиск проводилися на універсальній гідравлічній випробувальній машині Tecnotest KL 2000 CE з

максимальним зусиллям навантаження 2000 кН. Машина забезпечує плавне прикладання навантаження та автоматичну реєстрацію параметрів випробування, що дозволяє визначати граничне навантаження та міцність матеріалу на стиск.

Перед початком випробувань кожен зразок оглядали на наявність видимих дефектів, після чого встановлювали по центру робочої зони випробувальної машини. Особлива увага приділялася правильності позиціонування кубів для виключення перекосів та виникнення додаткових згинальних моментів під час навантаження.

Процес навантаження здійснювався плавно та безперервно зі зростанням прикладеної сили до моменту руйнування зразка. Під час випробування автоматизована система машини реєструвала величину навантаження, а максимальне значення навантаження безпосередньо перед руйнуванням приймалося як руйнівне навантаження.

Загальний вигляд випробувальної установки та процес проведення експерименту зображено на рисунку 4.7.



Рисунок 4.7 – Проведення випробувань бетонних кубів на статичний стиск.

До програмного забезпечення випробувальної машини вводилися геометричні параметри зразків. Після досягнення руйнівного навантаження система автоматично виконувала розрахунок міцності на стиск та відображала отримані результати на дисплеї оператора. Реєструвалися максимальне навантаження та відповідне значення міцності на стиск, яке використовувалося для подальшого аналізу результатів.

4.3.3 Результати досліджень на статичний стиск зразків з різними типами армування

Після завершення випробувань було отримано значення міцності на стиск для всіх дослідних зразків. Результати досліджень для бетонних кубів, армованих сталевую та композитною арматурою, а також для контрольної серії без армування наведені в таблиці 4.3

Таблиця 4.3 – Результати випробувань бетонних кубів на статичний стиск

№ зразка	Тип зразка	Міцність на стиск, МПа	Середня міцність, МПа
1	Сталева арматура	43,96	40,5
2		37,43	
3		34,57	
4		41,15	
5		40,08	
6		45,85	
7	Композитна арматура	41,19	41,2
8		36,05	
9		41,45	
10		45,28	

11		40,32	
12		42,71	
13	Без армування	39,29	39,3
14		44,25	
15		38,91	
16		39,25	

Аналіз отриманих результатів показав, що всі дослідні зразки продемонстрували достатньо близькі значення міцності на стиск. Найвищу середню міцність показали контрольні бетонні куби без армування – 40,8 МПа. Для зразків зі сталеву арматурою середнє значення міцності склало 40,51 МПа, тоді як для зразків із композитною арматурою – 41,16 МПа.

Отримані результати свідчать про те, що наявність центрально розташованого армувального елемента практично не впливає на величину міцності бетонних кубів при осьовому стиску. Це пояснюється тим, що основне навантаження в даному випадку сприймається бетонною матрицею, а арматурний стержень, розташований у центрі зразка, не бере суттєвої участі у сприйнятті стискальних напружень до моменту руйнування бетону.

Певне зниження середньої міцності армованих зразків порівняно з контрольною серією може бути пов'язане з технологічними особливостями виготовлення зразків, локальним порушенням однорідності бетонної структури поблизу арматурного стержня, а також природним розкидом характеристик бетону. При цьому різниця між середніми значеннями міцності не перевищує 8 %, що не дозволяє говорити про суттєвий вплив типу арматури на несучу здатність бетонних кубів за умов центрального стиску.

Таким чином, результати проведених випробувань показали, що як сталеву, так і композитну арматуру забезпечують близькі показники міцності бетонних зразків на стиск.

4.3.5 Дослідження характеру розповсюдження крихкої тріщини експериментальних зразків з бетону з різними типами армування при випробування на стиск

Проведені дослідження підтвердили, що при роботі бетонних елементів на центральний стиск визначальним фактором є міцність самого бетону, тоді як тип армування не чинить істотного впливу на величину граничного навантаження. Водночас використання як сталевोї, так і композитної арматури позитивно впливає на характер руйнування, сприяючи збереженню цілісності конструкції після досягнення граничного стану.

Таким чином, результати експерименту показали, що композитна арматура діаметром 14 мм забезпечує роботу бетонних зразків при стиску на рівні, близькому до традиційної сталевोї арматури аналогічного діаметра. Це свідчить про можливість її застосування в бетонних конструкціях за умов врахування особливостей роботи матеріалу та вимог до конкретних умов експлуатації.

Під час проведення випробувань було також проаналізовано характер руйнування дослідних зразків після досягнення граничного навантаження. Незалежно від типу армування всі бетонні куби руйнувалися за подібним механізмом, характерним для випробувань на центральний стиск. У процесі навантаження спочатку спостерігалось утворення вертикальних та похилих тріщин, після чого відбувалося інтенсивне розкриття тріщин і відокремлення окремих фрагментів бетону.

На завершальній стадії випробувань відбувалося локальне подрібнення бетону в зоні прикладання навантаження та руйнування структури зразка з утворенням значної кількості уламків. При цьому основний об'єм руйнувань концентрувався вздовж площин максимальних стискальних і зсувних напружень, що відповідає типовому механізму руйнування бетонних елементів при осьовому стиску.

Загальний вигляд зразків у процесі випробування та після руйнування наведено на рисунку 4.8.



а



б

Рисунок 4.8 – Руйнування бетонних кубів під час випробувань на статичний стиск: а – зразок у момент руйнування під навантаженням; б – загальний вигляд зруйнованих зразків після завершення випробувань.

Аналіз отриманих знімків показав, що руйнування супроводжувалося розвитком системи наскрізних тріщин та відколюванням фрагментів бетону по бічних гранях зразків. При цьому характер пошкоджень відповідає класичній схемі руйнування бетонних кубів при стиску та підтверджує коректність проведення випробувань.

Суттєвих відмінностей у механізмі руйнування між зразками зі сталевою та композитною арматурою виявлено не було. В усіх випадках визначальним фактором руйнування виступала міцність бетонної матриці, тоді як вплив армувального елемента на характер поширення тріщин був незначним. Це узгоджується з отриманими результатами міцності та підтверджує, що при центральному стиску робота конструкції переважно визначається властивостями бетону.

4.4 ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПОВТОРНОГО НАГРІВАННЯ НА СТРУКТУРУ ТА ВЛАСТИВОСТІ ТЕРМІЧНО ЗМІЦНЕНОЇ СТЕРЖНЕВОЇ АРМАТУРИ КЛАСУ A500C

Під час експлуатації залізобетонних конструкцій в умовах пожежі арматурна сталь може зазнавати впливу високих температур, що призводить до зміни її структури та механічних властивостей. Незважаючи на те, що бетон виконує функцію теплового бар'єра та певний час захищає арматуру від безпосереднього нагрівання, за тривалого теплового впливу температура сталевих стержнів поступово підвищується, що може викликати втрату ефекту термомеханічного зміцнення.

З метою оцінки структурних змін, які можуть відбуватися в арматурі під час пожежі, було проведено високотемпературне нагрівання залізобетонних зразків із термічно зміцненою арматурою класу A500C діаметром 14 мм. Нагрівання здійснювали в лабораторній електропечі СНО 4/1100В4ПД до температури 1000 °C. Після досягнення заданої температури зразки не піддавали примусовому охолодженню, а залишали в печі до повного охолодження разом із нею. Такий режим забезпечував повільне зниження температури та дозволяв оцінити граничний випадок структурних змін, які можуть виникати після інтенсивного теплового впливу.

Після високотемпературного нагрівання до 1000 °C характерна зональна будова термічно зміцненої арматури повністю змінилась. На макрошліфах більше не спостерігалися характерні темні та світлі кільцеві зони, які були притаманні вихідному стану матеріалу. Це свідчить про повну зміну структури, сформованої під час термомеханічного зміцнення, та перебіг фазових перетворень у всьому об'ємі металу.

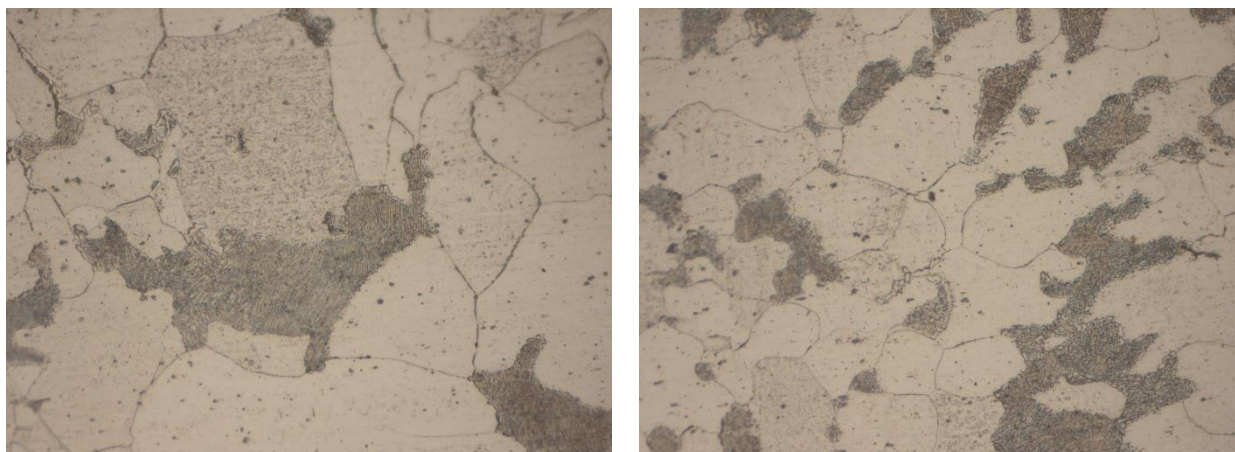
На рисунках 4.9 – 4.10 зображена мікроструктура сталевих арматур після термічного випробування.



Рисунок 4.9 – Макроструктура арматури класу А500С після нагрівання до температури 1000 °С та охолодження разом із піччю x100.

Металографічні дослідження показали, що після охолодження у всіх досліджуваних ділянках перерізу сформувалася практично однорідна ферито-перлітна структура. Світлі області структури представлені зернами фериту, тоді як темніші ділянки відповідають колоніям перліту. Розподіл структурних складових по перерізу є рівномірним, а відмінності між поверхневими та центральними зонами практично відсутні.

Формування ферито-перлітної структури пояснюється повним аустенітизуванням сталі під час нагрівання до температури 1000 °С та подальшим повільним охолодженням у печі. За таких умов розпад аустеніту відбувається дифузійним механізмом із формуванням рівноважних структурних складових. Внаслідок цього мартенсит і бейніт, характерні для термічно зміцненого стану, повністю зникають.



а

б

Рисунок 4.10 – Мікроструктура арматурного стержня після високотемпературного нагрівання ($\times 500$): а – поверхневої частини, б – центральної частини

Порівняння мікроструктури до та після нагрівання показало, що в результаті високотемпературного впливу відбулося повне усунення ефекту термомеханічного зміцнення. Одночасно спостерігається укрупнення феритних зерен та перлітних колоній, що є характерною ознакою повільного охолодження після нагрівання до аустенітної області.

Отримані результати свідчать про те, що у випадку тривалого впливу високих температур, характерних для пожежі, термічно зміцнена арматура класу A500C втрачає сформовану під час виробництва багатошарову структуру та переходить у більш рівноважний ферито-перлітний стан. Такі структурні зміни неминуче супроводжуються зниженням міцнісних характеристик матеріалу та повинні враховуватися під час оцінки залишкової несучої здатності залізобетонних конструкцій після пожежного впливу.

4.5 Дослідження впливу високотемпературного нагрівання на структуру та властивості композитної арматури

На відміну від сталевих арматур, зміна властивостей композитних армувальних елементів під дією високих температур пов'язана насамперед із термічною стійкістю полімерної матриці, яка забезпечує зв'язок між армувальними волокнами та передачею навантаження всередині матеріалу. Підвищення температури призводить до поступової деградації полімерного сполучного, що може супроводжуватися втратою міцності, зміною структури поверхневого шару та погіршенням міжфазної взаємодії між волокнами і матрицею.

Для оцінки наслідків високотемпературного впливу було проведено аналіз зовнішнього вигляду та структурного стану композитної арматури після нагрівання у складі залізобетонних зразків. Особливу увагу приділено дослідженню змін поверхні арматурних стержнів, стану торцевих ділянок та характеру структурних змін у поперечному й поздовжньому перерізах після завершення термічного циклу.

Проведений макроскопічний аналіз показав, що після високотемпературного впливу на поверхні композитної арматури спостерігаються характерні ознаки термічної деградації полімерної складової. Зокрема відзначається зміна кольору поверхні, поява локальних ділянок руйнування сполучного та часткове оголення армувальних волокон, що свідчить про перебіг процесів термічного розкладання полімерної матриці.

Після нагрівання макроаналіз показав, що поверхня арматурних стержнів втратила характерний зовнішній вигляд, притаманний вихідному стану матеріалу. В окремих ділянках спостерігаються сліди вигорання полімерного сполучного та зміна рельєфу поверхні. Подібні зміни свідчать про суттєвий вплив високої температури на органічні складові композиту, які є найбільш чутливими до термічного навантаження.

Макроструктурні дослідження торцевої поверхні дозволило оцінити стан армувальних волокон після термічної обробки. Встановлено, що загальна орієнтація волокон зберігається, проте спостерігаються ознаки погіршення зв'язку між окремими елементами армувального каркаса. Це пояснюється

частковою втратою полімерної матриці, яка забезпечує сумісну роботу волокон у структурі композитного матеріалу.

Для більш детального аналізу наслідків нагрівання було досліджено поперечний переріз композитної арматури. Встановлено, що після термічного впливу структура матеріалу залишається неоднорідною та складається з армувальних волокон і залишків полімерного сполучного. Водночас спостерігаються окремі ділянки підвищеної пористості, які можуть бути пов'язані з термічним руйнуванням матриці та видаленням продуктів її розкладання.

Таким чином, проведені дослідження показали, що високотемпературний вплив призводить насамперед до деградації полімерної матриці композитної арматури. Основні зміни проявляються у зміні зовнішнього вигляду поверхні, появі локальної пористості та погіршенні міжфазної взаємодії між армувальними волокнами і сполучним. При цьому самі волокна значною мірою зберігають свою геометрію та орієнтацію. Для детального вивчення структурних змін, що відбулися після нагрівання, було проведено металографічні та електронно-мікроскопічні дослідження, результати яких наведено в наступних підрозділах.

4.6 Електронно-мікроскопічні дослідження сталевих арматур після нагрівання

Електронно-мікроскопічні методи дослідження є ефективним інструментом для аналізу структурного стану металевих матеріалів після термічного впливу. На відміну від традиційної металографії, використання растрової електронної мікроскопії дозволяє досліджувати особливості морфології структурних складових при значно більших збільшеннях та детально оцінювати зміни, що відбуваються в матеріалі внаслідок фазових перетворень.

У процесі високотемпературного нагрівання термічно зміцненої арматури класу A500C до температури 1000 °C відбувається повна перебудова структури металу. Вихідна багатошарова будова, сформована під час термомеханічного зміцнення, руйнується внаслідок аустенітизації сталі, а подальше повільне охолодження сприяє формуванню рівноважної ферито-перлітної структури. Такі структурні зміни супроводжуються втратою зміцнених мартенситних і бейнітних складових та суттєво впливають на експлуатаційні властивості арматури.

Після нагрівання до температури 1000 °C та подальшого охолодження разом із піччю в арматурі відбулися суттєві структурні перетворення, пов'язані з повною аустенітизацією металу та наступним формуванням рівноважної ферито-перлітної структури. У результаті було втрачено характерну багатошарову будову, яка формувалася під час термомеханічного зміцнення арматурного прокату.

Електронно-мікроскопічні дослідження проводилися на шліфах, підготовлених із центральної частини арматурного стержня після термічного впливу, адже структурні перетворення повністю прибрали зональність структур, та була отримана рівноважна ферито-перлітна структура. Отримані мікрофотографії, зображені на рисунку 4.11, дозволяють оцінити морфологію феритних зерен, особливості розташування перлітних колоній та характер структурної неоднорідності металу після нагрівання.

При порівнянні однієї й тієї ж зони видно що структура після повної аустенітизації та подальшого охолодження разом із піччю спостерігається формування значно грубішої та більш рівноважної структури.

У процесі повільного охолодження відбувається дифузійний розпад аустеніту, що супроводжується укрупненням феритних зерен та формуванням перлітних колоній. Межі зерен фериту мають чітко виражений поліедричний характер, що свідчить про завершення процесів рекристалізації та формування стабільної рівноважної структури. Перлітні ділянки розташовуються переважно між феритними зернами та мають характерну пластинчасту будову.

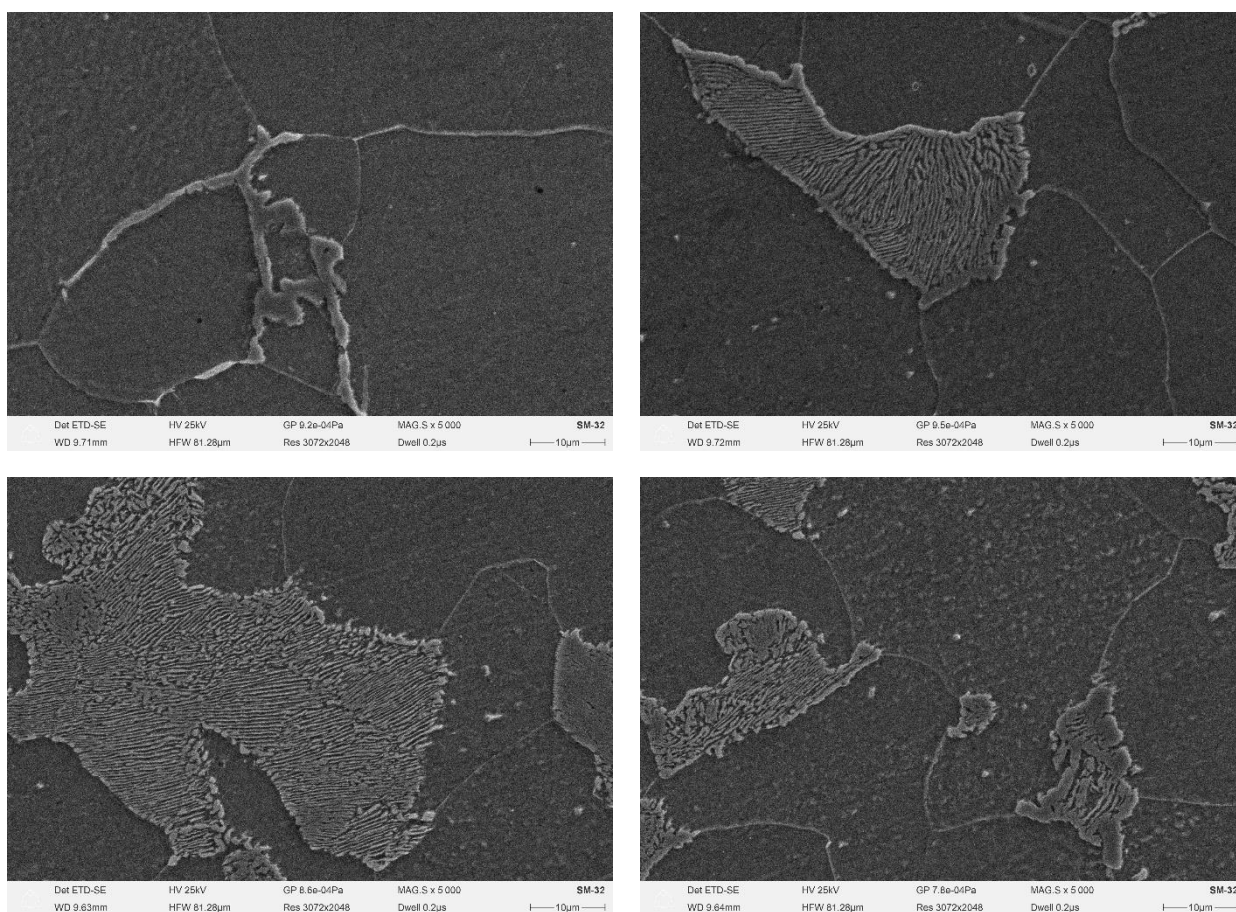


Рисунок 4.11 – Мікроструктура термозміцненого арматурного стрижня після 1000°C та охолодження в печі

Отримані результати підтверджують, що високотемпературне нагрівання призводить до повної втрати ефекту термомеханічного зміцнення арматури класу A500C. Сформована після охолодження ферито-перлітна структура характеризується меншою дисперсністю порівняно з вихідним станом, що безпосередньо впливає на зниження міцнісних характеристик матеріалу та зміну його експлуатаційних властивостей.

4.7 EDX-аналіз залізної арматури після нагрівання

Для визначення елементного складу арматури класу A500C після високотемпературного нагрівання було проведено локальний EDX аналіз

поверхні шліфа, зображений на рисунках 4.12 – 4.13. Дослідження виконувалося в декількох характерних точках, що дало можливість оцінити однорідність хімічного складу та виявити можливі локальні включення.

Результати аналізу показали, що основним елементом досліджуваного матеріалу є залізо, вміст якого в більшості точок перевищує 86–91 %. Такі результати відповідають хімічному складу низьковуглецевої арматурної сталі та підтверджують належність досліджуваного матеріалу до сталевих сплавів на основі заліза.

Окрім заліза, у складі металу виявлено вуглець, марганець, а також незначні кількості кремнію та алюмінію. Наявність марганцю пояснюється його використанням як легувального елемента, що підвищує міцність та прокаліюваність сталі. Кремній та алюміній можуть бути пов'язані як із технологічними особливостями розкислення сталі, так і з присутністю окремих неметалевих включень.

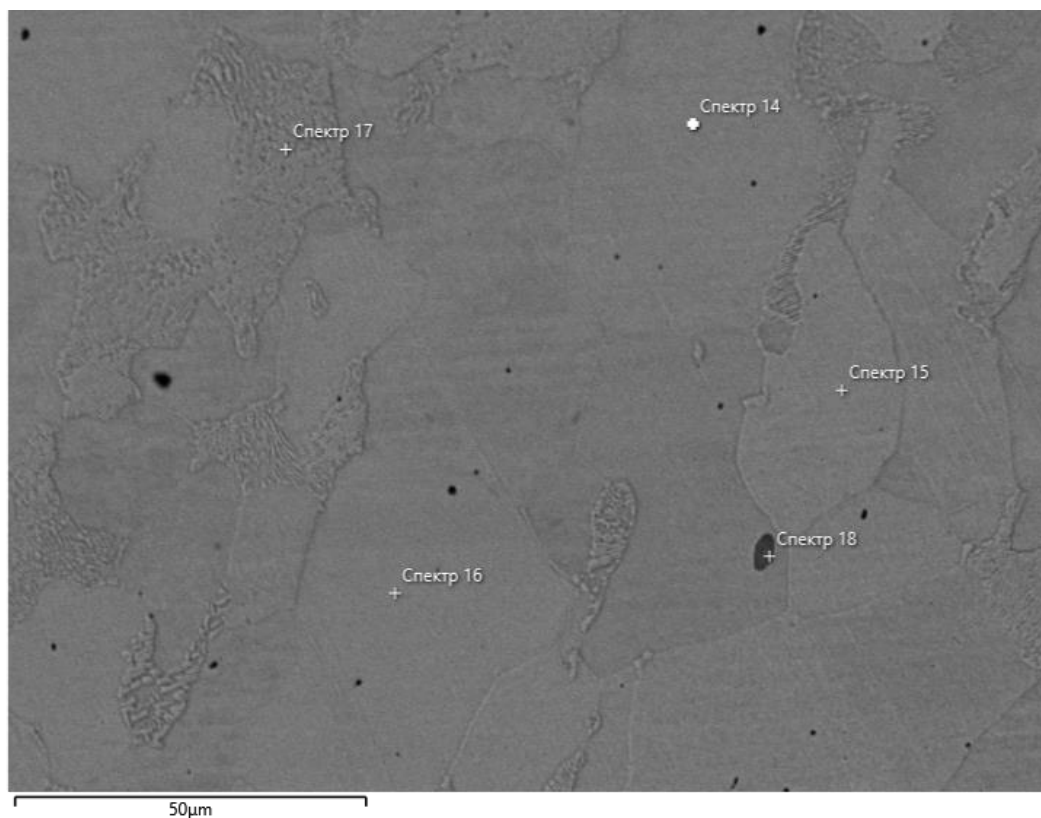


Рисунок 4.12 – EDX-аналізу арматури A500C після 1000°C та охолодження в печі

У спектрі 18 було зафіксовано підвищений вміст марганцю та сірки. За допомогою ЕДХ аналізу було встановлено що в структурі феритоперліту на границі зерен, було виявлено нематалеві включення а саме сульфіди, що в свою чергу може провокувати утворення численних докритичних тріщин.

Отримані результати свідчать, що після нагрівання до температури 1000 °C суттєвих змін хімічного складу металевої основи не відбулося. Основні зміни пов'язані з перебудовою мікроструктури внаслідок повної аустенітизації та подальшого формування ферито-перлітної структури під час повільного охолодження.

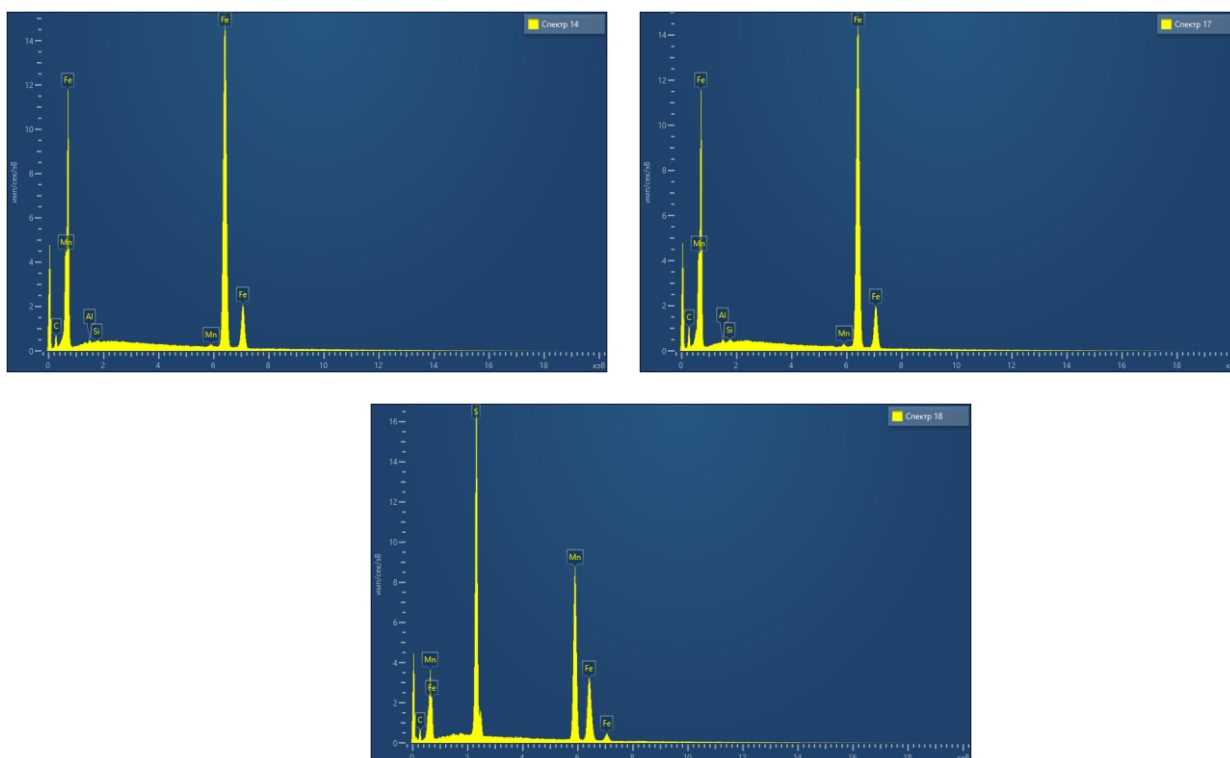


Рисунок 4.13 – Графіки спектрів EDX-аналізу арматури A500C після 1000°C та охолодження в печі

Представлені на рисунку 4.19 спектри демонструють подібний характер розподілу інтенсивності характеристичного рентгенівського випромінювання для більшості досліджених ділянок. Основними елементами, що ідентифікуються на спектрах, є Fe, Mn та C. Виявлені відмінності в інтенсивності окремих піків обумовлені локальною неоднорідністю складу та наявністю окремих структурних складових. Для визначення масової частки елементів у досліджуваних точках було проведено кількісний EDX-аналіз, результати якого наведено в таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 – Елементний склад арматури A500C за результатами EDX-аналізу

Спектр	C, %	Al, %	Si, %	S, %	Mn, %	Fe, %
14	7,67	0,39	0,00	–	0,47	91,46
15	8,26	0,29	0,12	–	0,49	90,84
16	8,35	0,29	0,15	–	0,39	90,82
17	12,83	0,32	0,11	–	0,62	86,12
18	16,14	–	–	24,20	43,61	16,05

Як видно з таблиці 4.4, основним елементом досліджуваних ділянок є залізо, вміст якого становить 86,12–91,46 %. Вміст марганцю не перевищує 0,62 %, що відповідає хімічному складу арматурних сталей класу A500C. Наявність вуглецю в межах 7,67–12,83 % пов'язана з особливостями методу EDX та внеском карбідних складових у досліджуваному об'ємі матеріалу. Отримані результати підтверджують відсутність суттєвих змін елементного складу металевої основи після високотемпературного нагрівання, а виявлені структурні зміни обумовлені переважно фазовими перетвореннями, що відбувалися під час аустенітизації та подальшого охолодження сталі.

4.8 Електронно-мікроскопічні дослідження композитної арматури після нагрівання

Для детального аналізу змін, що відбулися у структурі композитної арматури після високотемпературного впливу, було проведено дослідження методом растрової електронної мікроскопії. Використання електронної мікроскопії дозволяє оцінити стан армувальних волокон, характер їх взаємодії з полімерною матрицею, а також виявити дефекти структури, які неможливо достовірно ідентифікувати методами оптичної металографії.

Отримані мікрофотографії дозволяють оцінити характер розподілу волокон у структурі матеріалу, стан полімерної матриці та особливості руйнування міжфазних меж після високотемпературного впливу. Результати електронно-мікроскопічних досліджень наведено на рисунках 4.14 – 4.15

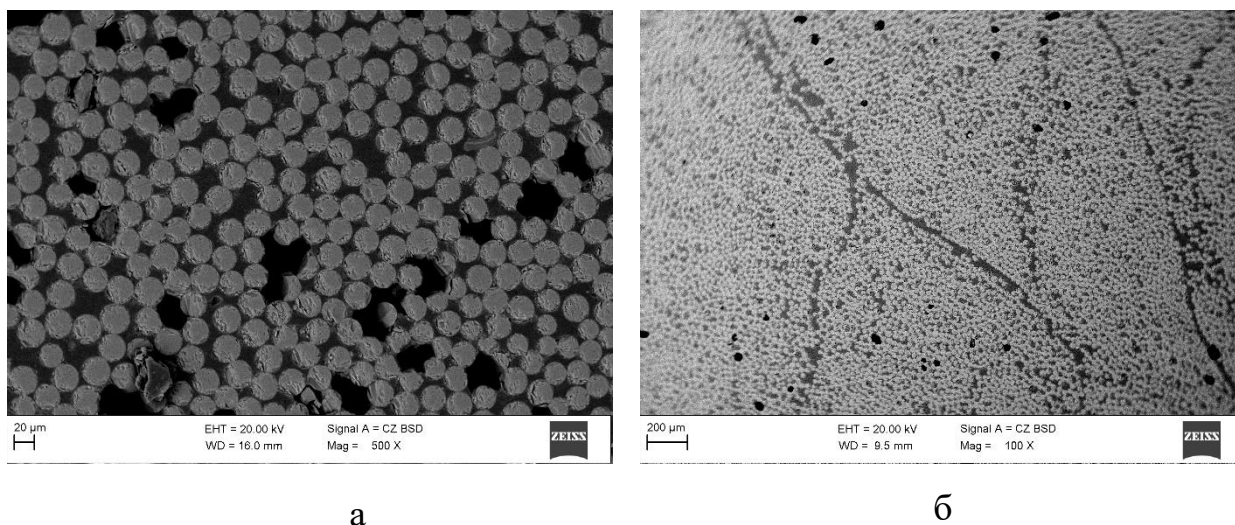
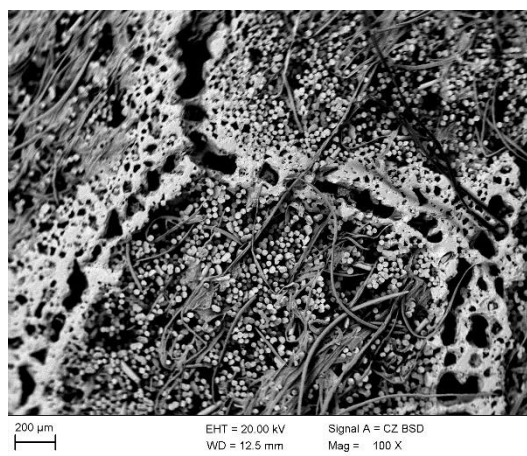
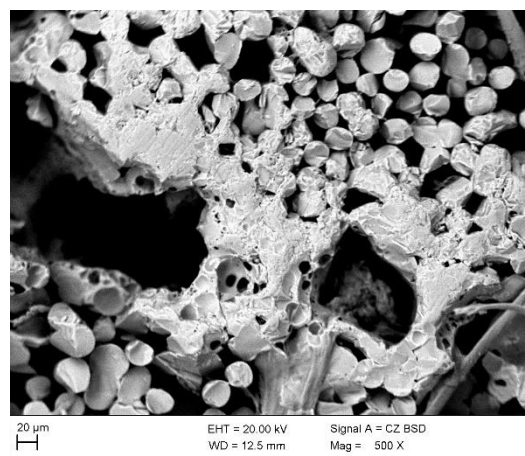


Рисунок 4.14 – Мікроструктура композитної арматури у стані поставки

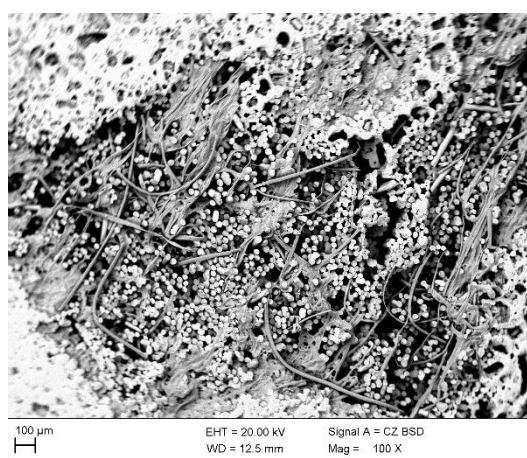
На знімках можна бачити різні зони наповненням скляними волокнами, наявні площини де відсутні волокна і заповнено тільки матрицею, а також зони точкофих дефектів, де видно відсутність компонентів.



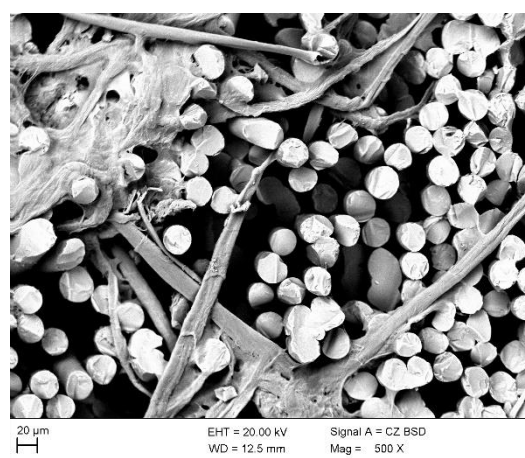
а



б



в



г

Рисунок 4.15 – Мікроструктура композитної арматури А500С після 1000°С та охолодження в печі

На рисунку 4.15 представлено мікроструктуру композитної арматури після нагрівання при збільшенні $\times 100$. У структурі чітко ідентифікуються армувальні волокна, рівномірно розташовані в об'ємі матеріалу. Незважаючи на високотемпературний вплив, волокна зберігають свою геометрію та безперервність.

Після високотемпературного нагрівання до 1000 °С та подальшого охолодження разом із піччю структура композитної арматури зазнає суттєвих змін (рис. 4.15). Найбільш помітні зміни пов'язані з термічною деградацією

полімерної матриці, яка під дією високої температури частково руйнується та втрачає здатність утримувати армувальні волокна в початковому положенні.

На знімках із збільшенням $\times 500$ (рис. 4.15, б, г) спостерігається значне зростання пористості матеріалу, поява великих порожнин та численних каналів, що утворилися внаслідок вигорання полімерного сполучного. Частина волокон виявляється повністю або частково оголеною. При цьому самі скловолокна зберігають свою форму та не демонструють ознак плавлення або руйнування.

На знімках при збільшенні $\times 100$ (рис. 4.15, а, б) добре видно порушення цілісності матриці та формування розгалуженої системи дефектів. У структурі спостерігаються ділянки локального відшарування сполучного від поверхні волокон, що свідчить про суттєве послаблення міжфазної взаємодії між армувальними елементами та матрицею.

Порівняння структури композитної арматури до та після нагрівання показує, що основним механізмом деградації матеріалу є руйнування полімерного сполучного. Незважаючи на збереження геометрії скловолокон, втрата цілісності матриці призводить до різкого погіршення здатності композиту ефективно сприймати та передавати механічні навантаження.

4.9 EDX-аналіз композитної арматури

EDX-аналіз композитної арматури проводився у трьох станах: у стані поставки, після витримки у складі бетонних зразків та після нагрівання до 1000 °C. Дослідження включало точковий аналіз у характерних зонах перерізу, лінійне сканування вздовж поверхні шліфів, а також картографування розподілу елементів по площі поперечного перерізу.

4.9.1 Елементний склад у стані поставки

У стані поставки дослідження проводилось методом лінійного EDX-сканування (лінії 4, 5, 6, 7 наведені в таблиці 4.5) та картографування розподілу елементів. Лінійне сканування охоплювало ділянки довжиною від 26,2 до 68,2 мкм (рис. 4.16 - 4.17).

Таблиця 4.5 – Середня інтенсивність сигналу (імп.) за лінійними профілями у стані поставки

Лінія	Довжина, мкм	Si K α	Ca K α	Al K α	O K α	C K α
4	68,2	66,3	27,2	18,6	11,2	2,1
5	26,2	51,8	21,2	14,6	8,2	4,1
6	36,1	60,3	25,0	17,3	11,6	6,3
7	39,9	76,7	31,5	21,7	14,0	14,9

За результатами аналізу лінійних профілів домінуючими елементами у всіх досліджених ділянках є Si, Ca та Al. Підвищений сигнал Si (51,8–76,7 імп.) та Ca (21,2–31,5 імп.) є характерним для зон волокон, тоді як у міжволоконних проміжках спостерігається локальне зниження інтенсивності Si та Ca і відносне зростання вмісту C. Картографування розподілу елементів підтвердило рівномірний розподіл Si та Ca по всій площі перерізу, що свідчить про рівномірне укладення скловолокон у полімерній матриці (рис. 4.X).

Додатковий аналіз точкових спектрів у стані поставки дозволив кількісно охарактеризувати хімічний склад окремих структурних складових. У зонах скловолокон домінуючими елементами є Si (26,4–33,1 мас. %), Ca (17,5–22,3 мас. %) та Al (5,8–8,2 мас. %), що відповідає силікатному складу AR-скла з підвищеним вмістом оксидів кальцію та алюмінію. Присутність кальцію є характерною ознакою лугостійкого скловолокна, в якому оксид кальцію виконує роль стабілізатора скляної матриці. У зонах полімерної матриці вміст вуглецю перевищує 72 мас. % при мінімальних значеннях Si (< 2 мас. %) та Ca (< 1 мас. %), що підтверджує органічну природу зв'язувального та відсутність значної дифузії неорганічних компонентів на межі «волокно–матриця».

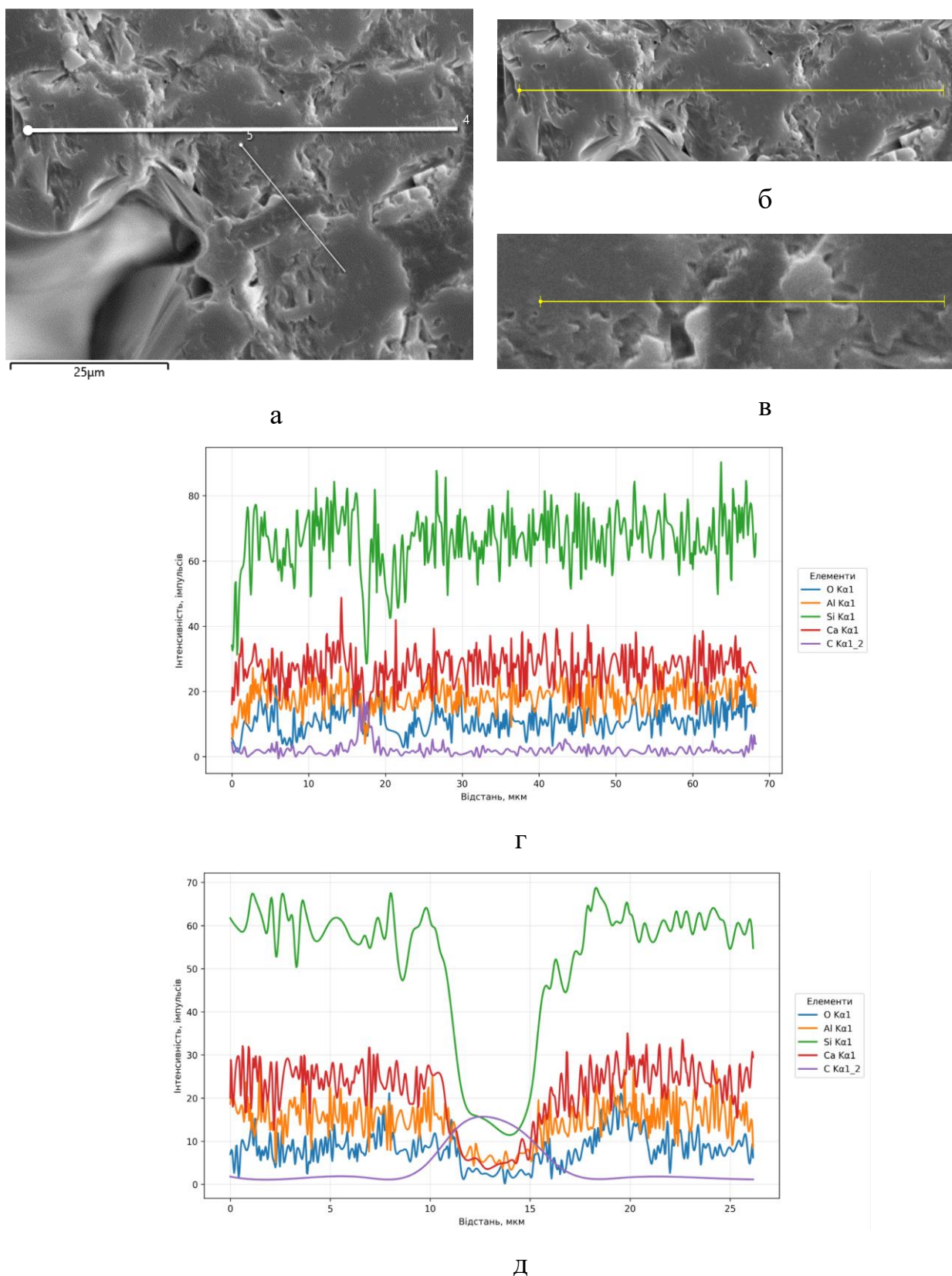


Рисунок 4.16 – Розподіл інтенсивності характеристичного випромінювання елементів вздовж лінії сканування композитної арматури, а – розташування ліній сканування, б – лінія 4, в – лінія 5, г – розподіл вздовж лінії 4, д – розподіл вздовж лінії 5

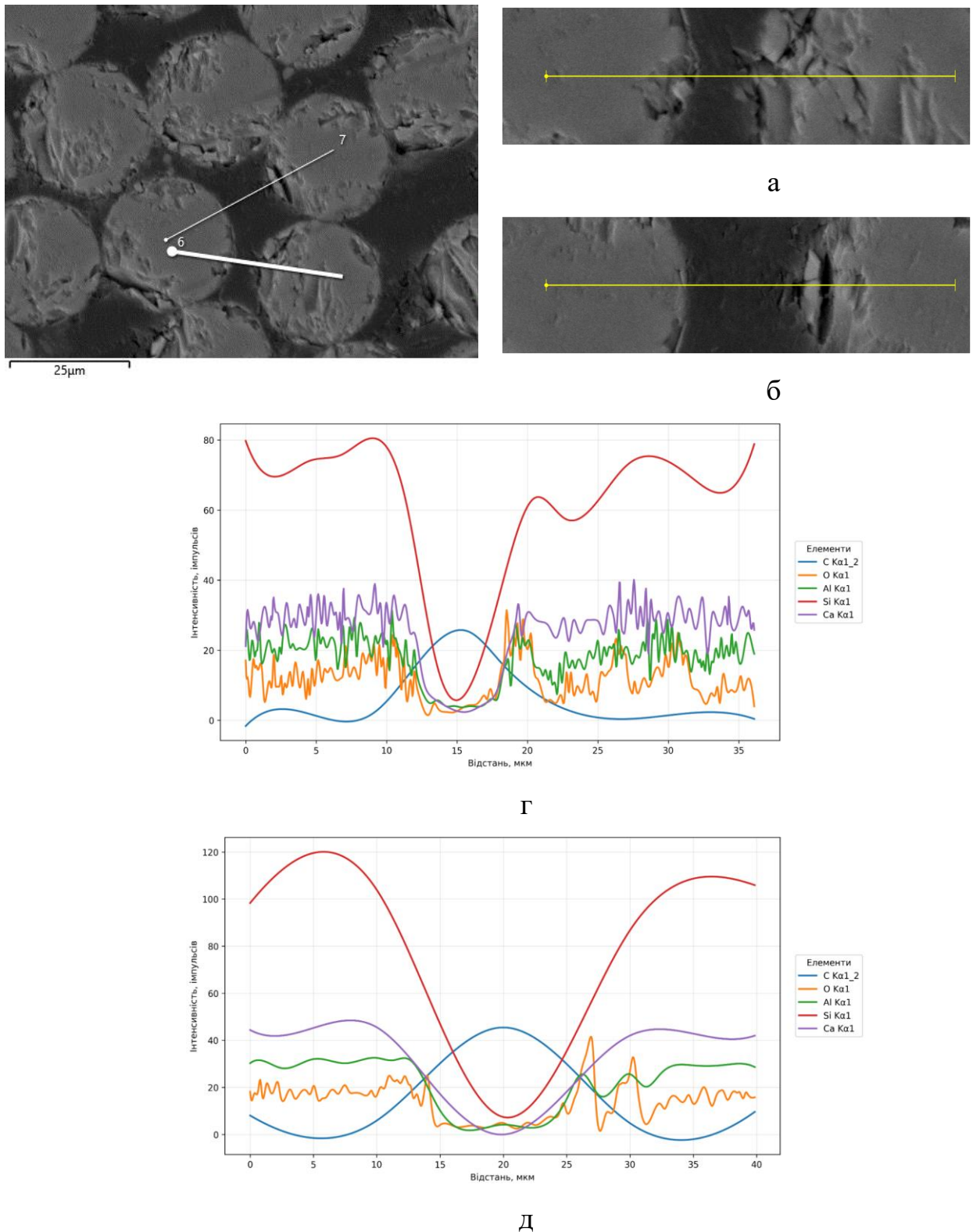


Рисунок 4.17 – Розподіл інтенсивності характеристичного випромінювання елементів вздовж лінії сканування композитної арматури, а – розташування ліній сканування, б – лінія 6, в – лінія 7, г – розподіл вздовж лінії 6, д – розподіл вздовж лінії 7

4.9.2 Елементний склад після витримки у складі бетонних зразків

Після 28-добового тверднення бетонних кубів та проведення механічних випробувань проводився точковий (спектри 1–8) (рис.4. 18, табл. 4.6) та лінійний (лінії 1–2) EDX-аналіз (рис. 4.20).

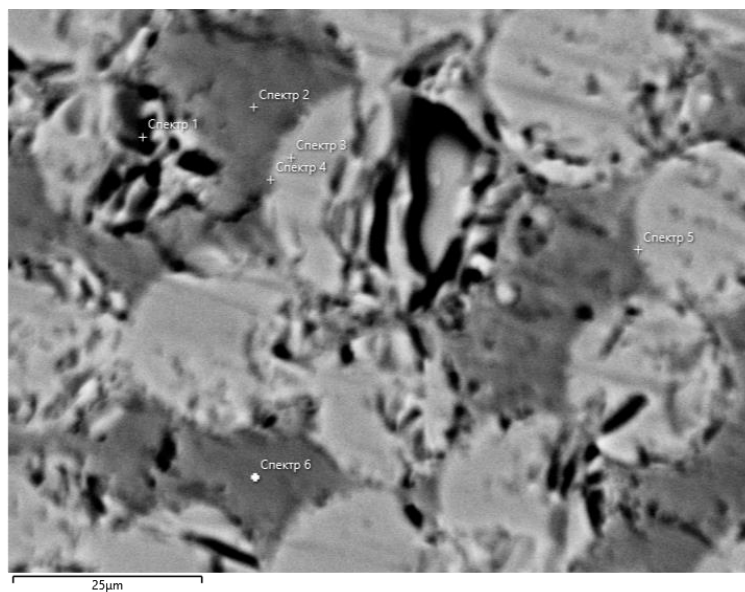
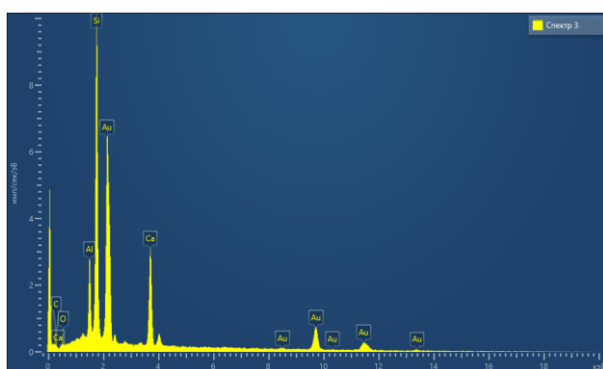
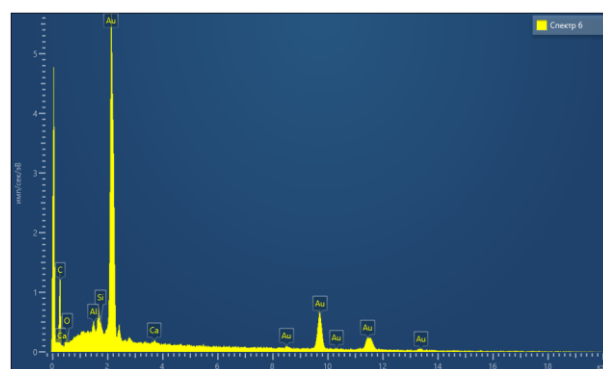


Рисунок 4.18 – EDX-аналізу композитної арматури після витримки в бетоні



а



б

Рисунок 4.19 – Графіки спектрів EDX-аналізу композитної арматури після витримки в бетоні: а – спектр 3, б – спектр 6

Таблиця 4.6 – Результати точкового EDX-аналізу після витримки у бетоні (вагові %)

Спектр	Зона	C, %	O, %	Al, %	Si, %	Ca, %
1	волокно	15,87	32,64	5,73	25,17	20,59
3	волокно	25,69	15,12	7,59	32,05	19,55
4	волокно	29,34	13,06	6,92	29,85	20,82
5	волокно	32,92	13,08	6,54	28,62	18,36
2	матриця	73,97	18,27	3,60	2,19	1,96
6	матриця	77,29	16,34	3,67	1,53	1,17

Точкові спектри дозволяють чітко ідентифікувати два типи зон у перерізі. У зонах скляних волокон (спектри 1, 3, 4, 5) зафіксовано підвищений вміст Si (25,17–32,05 %), Ca (18,36–20,82 %) та Al (5,73–7,59 %). У зонах полімерної матриці (спектри 2, 6) вміст C перевищує 73 % при мінімальному вмісті Si та Ca. Елементний склад волокон після витримки у бетоні є ідентичним стану поставки — середній вміст Si становить близько 28,9 %, Ca — 19,8 %, Al — 6,7 %. Ознак хімічної взаємодії з компонентами цементного каменю у складі волокон не виявлено. Карта розподілу елементів після витримки у бетоні наведена на рис. 4.26.

Лінійні профілі 1 та 2 довжиною 17,5 та 36,5 мкм (рис. 4.27) зберігають характерне чергування зон підвищеного Si–Ca (волокна) та знижених Si–Ca із зростанням C (матриця), аналогічне стану поставки. Середня інтенсивність Si у лінії 2 становить 53,5 імп., Ca — 21,3 імп.

Н рисунках 4.21 – 4.22 зображено карту розподілу хімічних елементів наявних в скловолоконній арматурі в стані поставки.

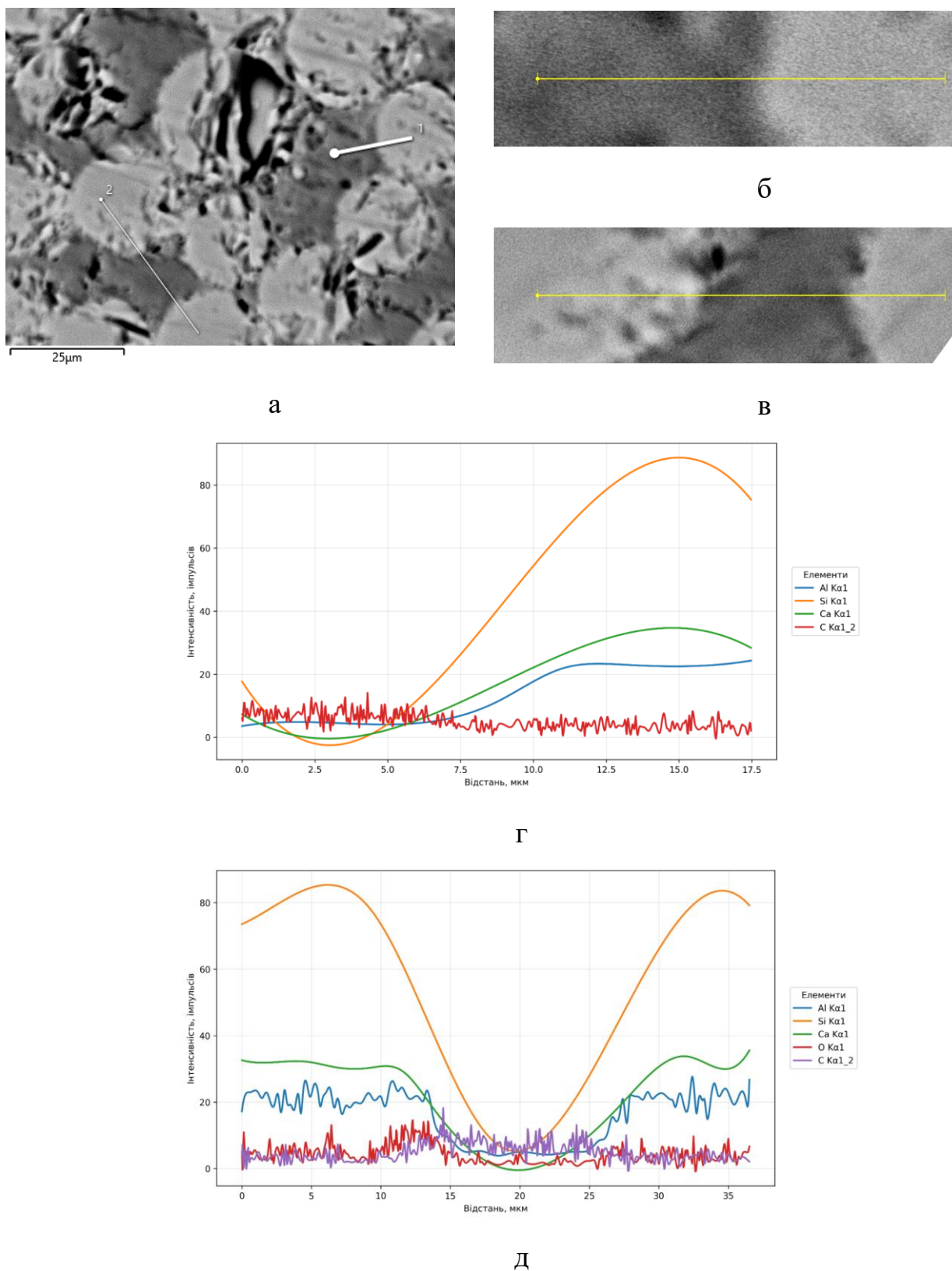


Рисунок 4.20 – Розподіл інтенсивності характеристичного випромінювання елементів вздовж лінії сканування композитної арматури, а – розташування ліній сканування, б – лінія 1, в – лінія 2, г – розподіл вздовж лінії 1, д – розподіл вздовж лінії 2

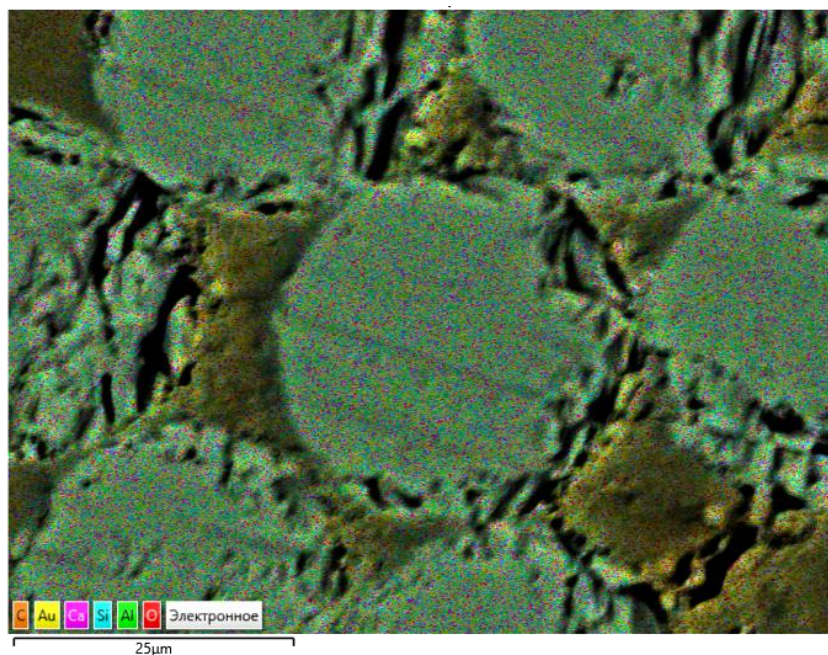


Рисунок 4.21 – Карта розподілу хімічних елементів в композитній арматурі після витримки в бетоні

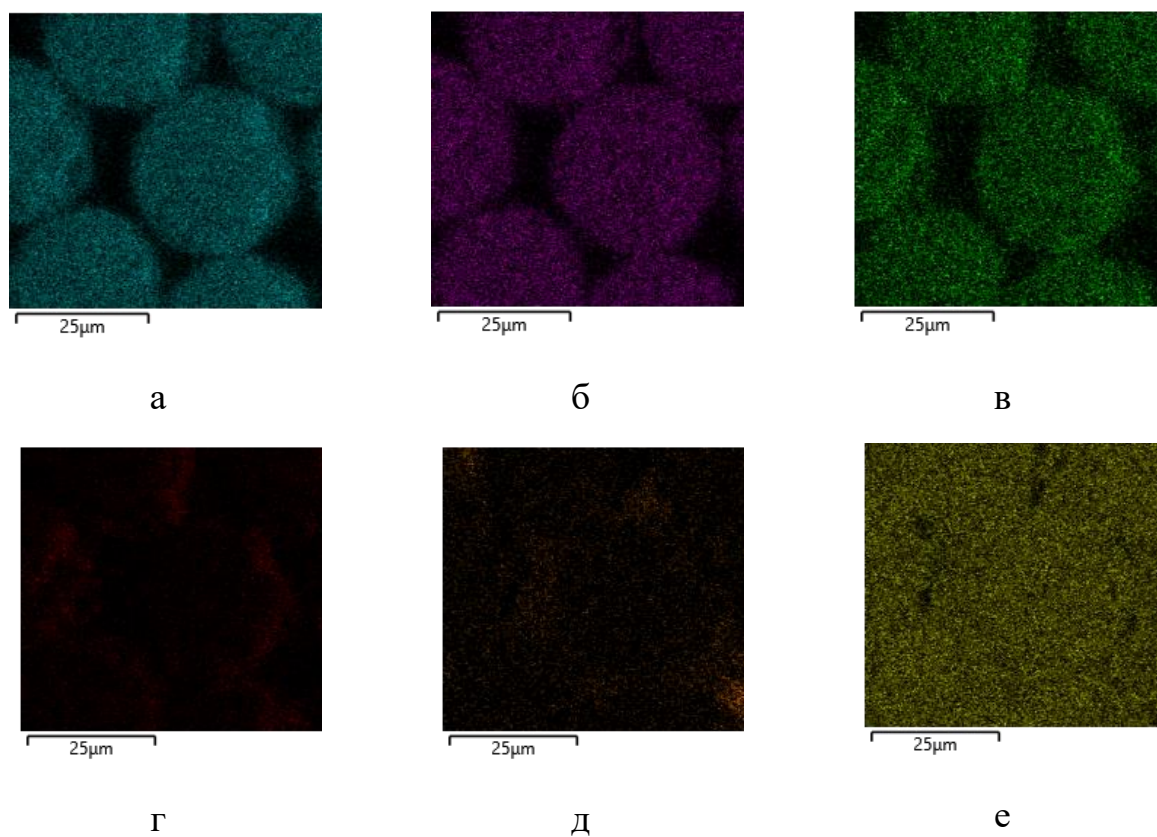


Рисунок 4.22 – Карти розподілу окремих елементів у композитній арматурі після витримки в бетоні, а – Si, б – Ca, в – Al, г – O, д – C, е – Au

4.9.3 Елементний склад після нагрівання до 1000 °С

Після нагрівання у складі бетонних зразків до 1000 °С та охолодження разом із піччю проведено точковий EDX-аналіз (спектри 10–25) рис. 4.23, 4.24 табл. 4.7 та лінійне сканування (лінія 3, довжина 150,5 мкм) рис.4.27.

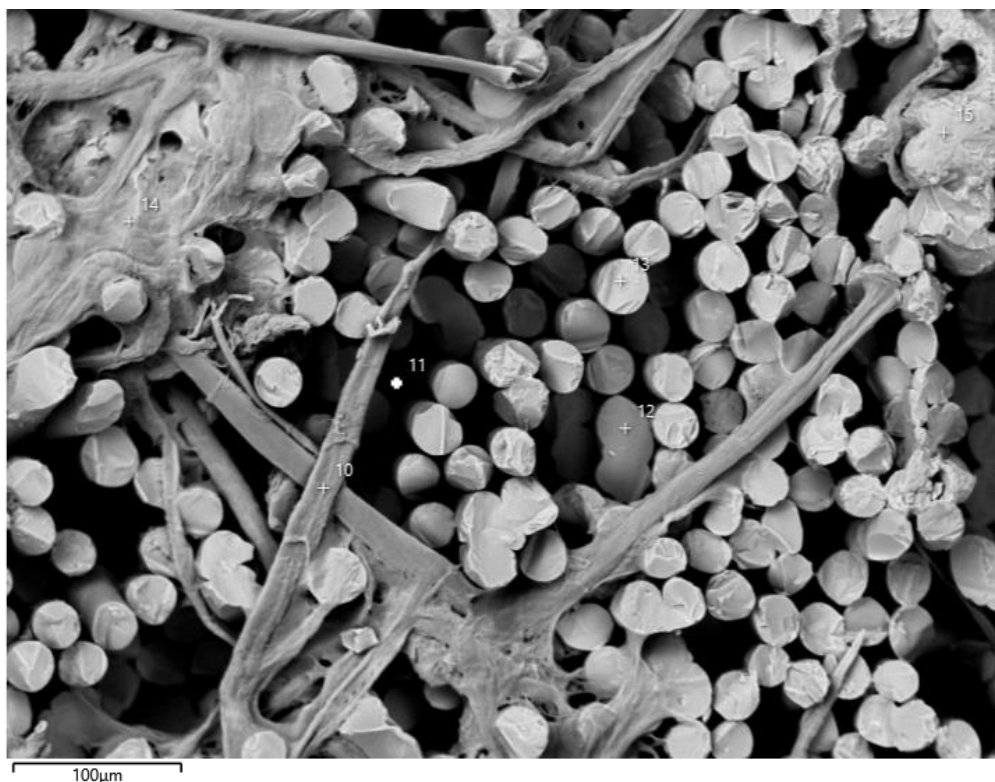


Рисунок 4.23 – Знімок мікротруктури отриманий на електронному мікроскопі, з вказанням місць спектрального аналізу

Таблиця 4.7 – Узагальнені результати точкового EDX-аналізу після нагрівання до 1000 °С (вагові %)

Зона	п спектрів	C, %	O, %	Al, %	Si, %	Ca, %
Волокна (Si > 10 %)	10	26,5	31,8	6,3	24,6	17,9
Деградована матриця (Si < 5 %)	5	61,4	36,5	0,4	0,3	1,1

У зонах скляних волокон після нагрівання (спектри з Si > 10 %) зберігається характерний для силікатного скла склад: Si (24,6 %), Ca (17,9 %), Al (6,3 %). Ці значення залишаються близькими до показників стану поставки. Картографування розподілу елементів після нагрівання наведено на рис. 4.25.

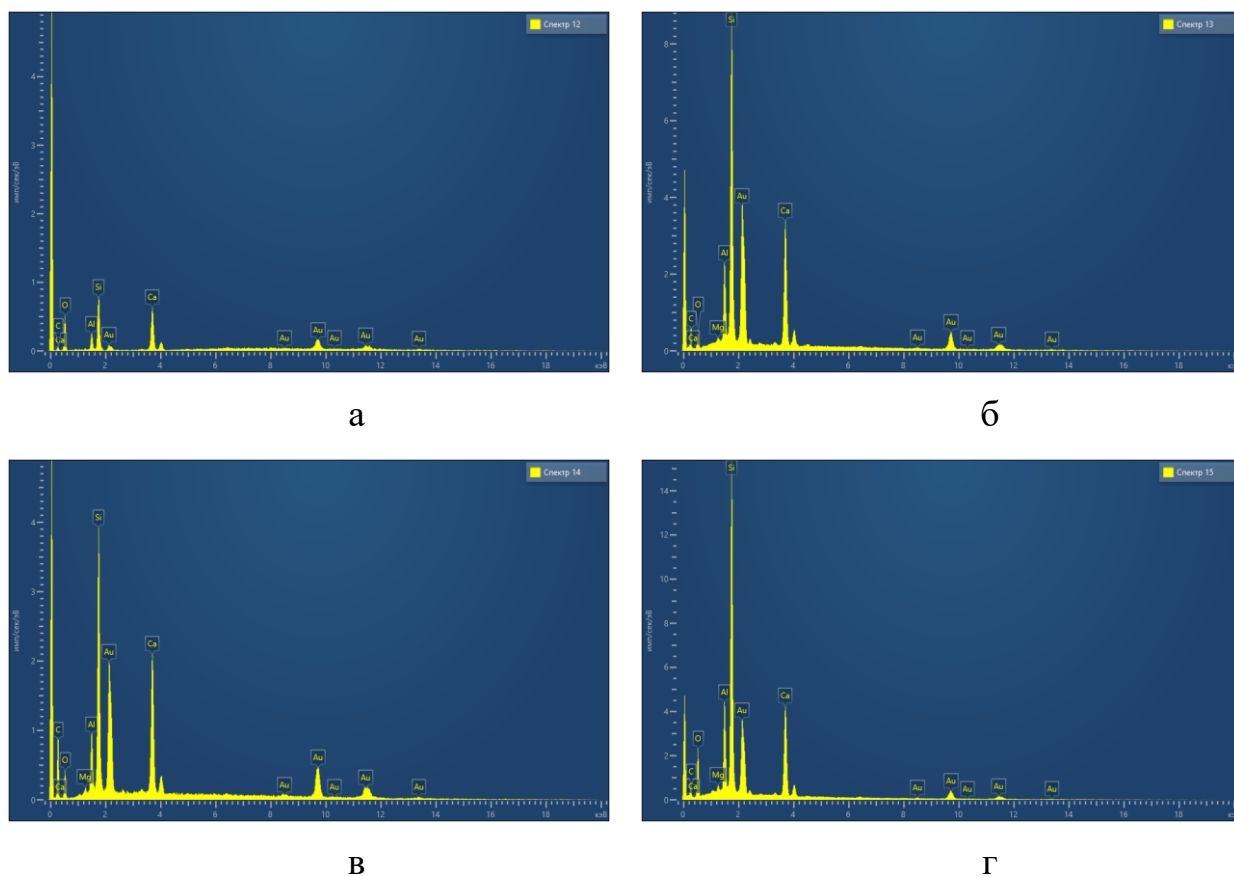


Рисунок 4.24– Графіки спектрів EDX-аналізу композитної арматури після нагрівання до 1000 °С

Детальний розподіл окремих хімічних елементів наведено на рис. 4.25. Кремній та кисень формують основну частину армувальних скловолокон (рис. 4.26 а, г), тоді як кальцій і алюміній присутні у складі силікатної фази волокон (рис. 4.26 б, д). Вуглець концентрується переважно в залишках полімерного сполучного та продуктах його термічного руйнування (рис. 4.26 е).



Рисунок 4.25 Карта розподілу хімічних елементів в композитній арматурі після нагрівання до 1000 °С

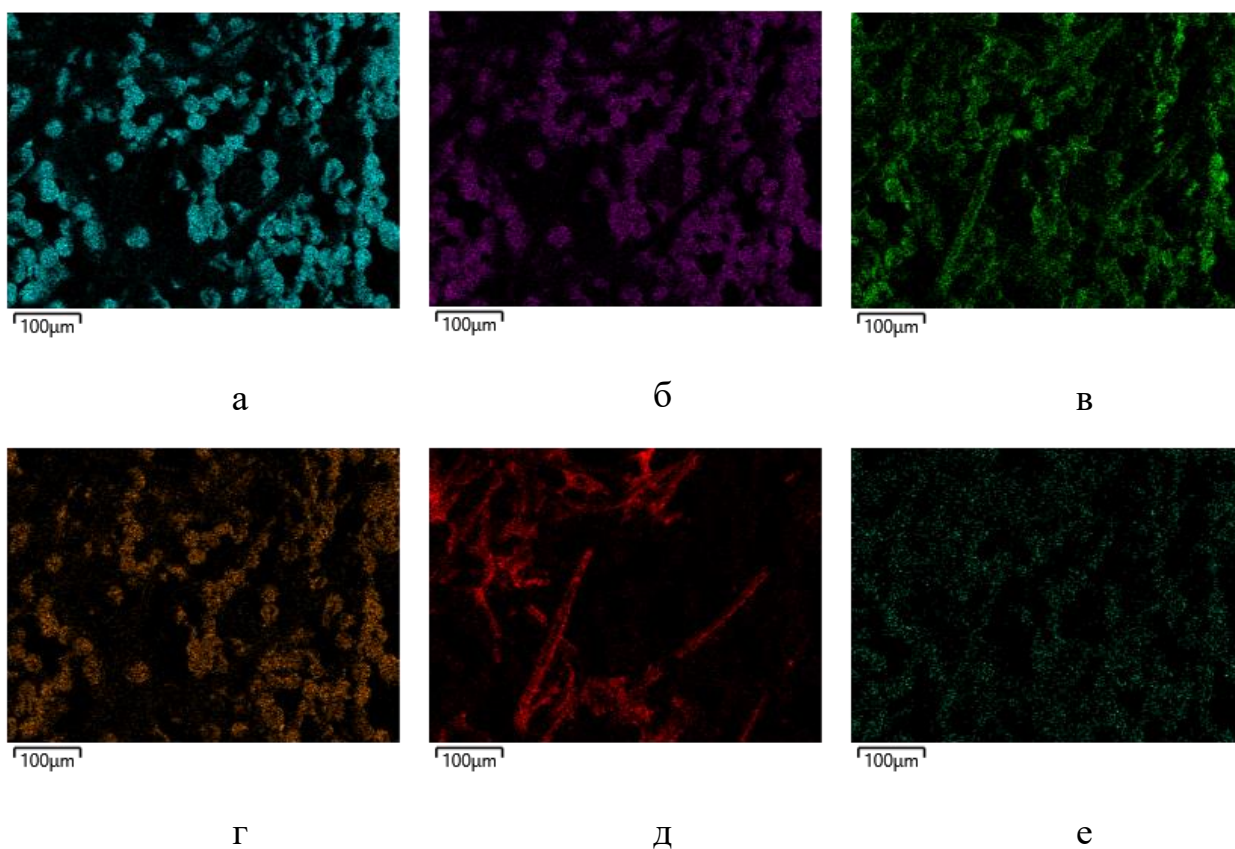


Рисунок 4.26 – Карти розподілу окремих елементів у композитній арматурі після нагрівання до 1000, а – Si, б – Ca, в – O, г – Al, д – C, е – Mg

У зонах полімерної матриці (спектри з $\text{Si} < 5\%$) зафіксовані кардинальні зміни: різко підвищений вміст С (у середньому 61,4 %) та О (36,5 %) при практичній відсутності Si і Ca. Спектр 18 є показовим — С 54,30 %, О 41,95 %, Si 1,65 % — і відповідає залишкам карбонізованої матриці після термічного розкладання полімерного сполучного.

Лінійний профіль 3 (150,5 мкм) є найдовшим серед усіх досліджених (рис. 4.27). Середня інтенсивність Si суттєво зросла — 97,2 імп. — порівняно зі станом поставки (51,8–76,7 імп.). Стандартне відхилення сигналу Si по лінії 3 становить 24,5 імп. проти 10,1 імп. у стані поставки, що свідчить про різко зрослу структурну неоднорідність: у місцях деградованої матриці утворились порожнини, а волокна частково відокремились одне від одного.

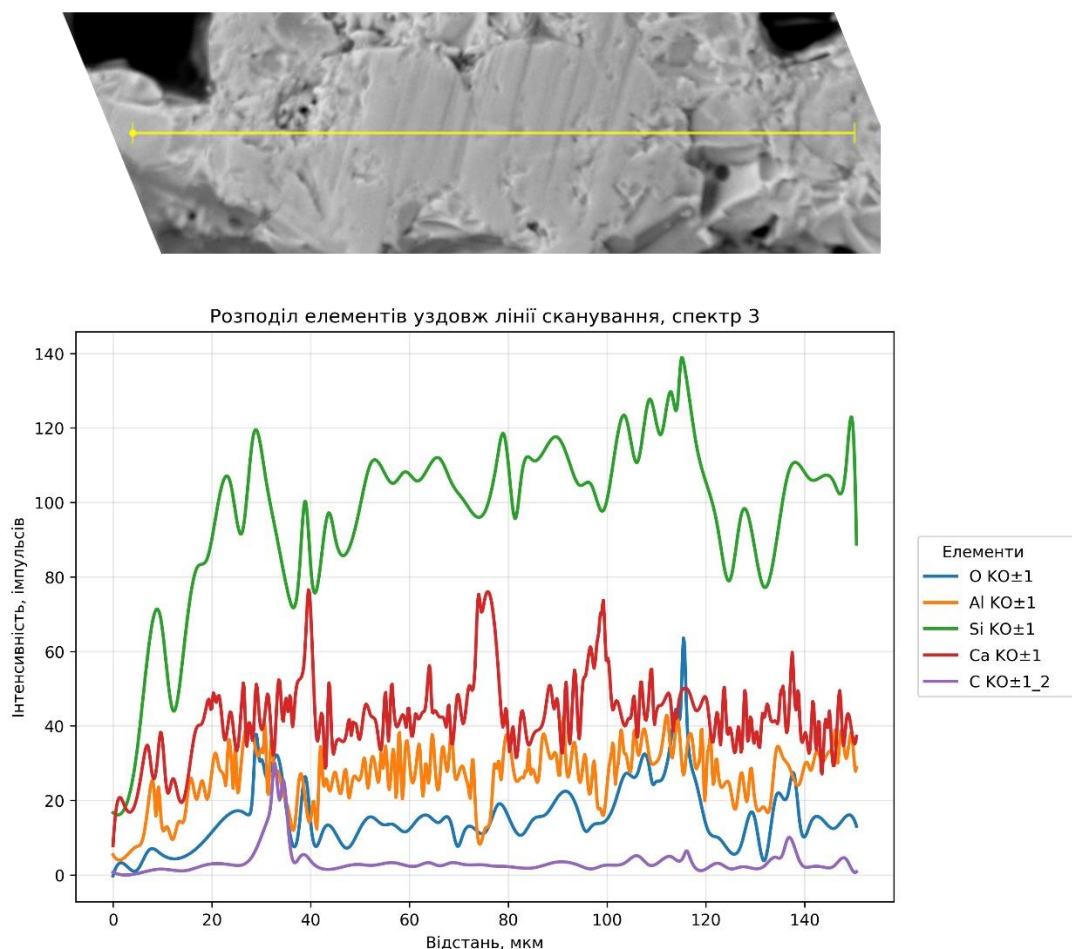


Рисунок. 4.27 – Розподіл інтенсивності характеристичного випромінювання елементів вздовж лінії сканування композитної арматури

Аналіз лінійного профілю 3 підтвердив чітке чергування ділянок з підвищеним сигналом Si та Ca, які відповідають перетинам скляних волокон, і проміжних ділянок зі зниженим вмістом Si–Ca та зростанням C, що відповідають полімерній матриці. На відміну від стану поставки, де перехід інтенсивності між волокном і матрицею є плавним, після нагрівання до 1000°C межа «волокно–матриця» стає значно різкішою, а в зонах матриці фіксуються провали сигналу Si практично до нуля – це відповідає утворенню порожнин після вигорання полімерного сполучного. Таким чином, розподіл хімічного складу вздовж профілю узгоджується з результатами точкового аналізу (табл. 4.9) та картографування (рис. 4.25–4.26): волокна зберігають свою хімічну природу (Si, Ca, Al) та геометрію в усіх трьох досліджених станах, тоді як полімерна матриця зазнає незворотної термічної деградації (карбонізації) з різким зростанням вмісту C і O та втратою зв'язку з волокнами.

4.10 Порівняльний аналіз впливу повторного нагрівання на структуру сталевोї та композитної арматури

Комплекс виконаних у четвертому розділі досліджень охоплює всі ключові аспекти поведінки двох типів арматури — від мікроструктури у стані поставки до хімічних змін після екстремального температурного впливу, що дозволяє провести їх цілісне порівняння за єдиною системою критеріїв.

За характером вихідної мікроструктури обидва матеріали є принципово різними. Термічно зміцнена арматура A500C формує у процесі виробництва чітко виражену трьохзонну концентричну будову поперечного перерізу (зони А–Д), де кожна зона відповідає певному продукту розпаду аустеніту залежно від локальної швидкості охолодження: від відпущеного мартенситу на поверхні до ферито-перлітної суміші у серцевині. Така структурна неоднорідність є носієм механічних властивостей арматури і водночас її вразливим місцем при термічному впливі. Скловолоконна арматура, навпаки, характеризується

статистично однорідним розподілом армувальних волокон (діаметром 19–38 мкм) у полімерній матриці без ознак зональності — її властивості визначаються не фазовим складом, а об'ємним співвідношенням і якістю міжфазної взаємодії компонентів.

При нагріванні до 1000 °С за кривою ISO 834 з подальшим повільним охолодженням разом із піччю обидва матеріали зазнають незворотних змін, однак їх механізми і наслідки кардинально відрізняються. У сталевій арматурі відбувається повна аустенітизація металу із подальшим дифузійним розпадом та формуванням рівноважної ферито-перлітної структури з укрупненими зернами. Характерна п'ятизонна будова, сформована термомеханічним зміцненням, повністю зникає — перетин стає мікроструктурно однорідним. Разом із тим конструктивна цілісність металевого стрижня зберігається: після охолодження він залишається суцільним і здатним сприймати навантаження, нехай і зі значно зниженими показниками міцності. У скловолоконній арматурі висока температура спричиняє незворотню термічну деструкцію полімерної матриці — її карбонізацію. При цьому армувальні скляні волокна демонструють значно вищу термічну стійкість і зберігають свою геометрію та просторову орієнтацію навіть після нагрівання до 1000 °С. Принциповою відмінністю є те, що руйнується саме міжфазне зчеплення: без матриці волокна втрачають здатність до спільної роботи і не можуть ефективно сприймати та передавати навантаження, тобто матеріал втрачає функцію армування навіть за умови збереження самих волокон.

Кількісне підтвердження зазначених механізмів отримано методом EDX-аналізу. В зонах полімерної матриці скловолоконної арматури після нагрівання вміст вуглецю зростає до 54–77 мас. %, кисню — до 36–42 мас. %, тоді як концентрації Si та Ca, що є маркерами силікатного скла, падають нижче 2 мас. % — фактично зникають з матричних зон. Натомість у зонах волокон склад залишається стабільним: Si 24–27 %, Ca 16–18 %, Al 5–7 %, що відповідає силікатному складу AR-скла. Для сталевих арматур EDX-аналіз підтвердив відсутність суттєвих змін хімічного складу металевої основи після нагрівання:

вміст Fe становить 86–91 %, марганцю не перевищує 0,62 %, що відповідає складу низьколегованих арматурних сталей. Додатково виявлено неметалеві сульфідні включення (MnS) на межах зерен феритно-перлітної структури, які можуть ініціювати зародження докритичних тріщин при повторному навантаженні.

Результати випробувань на статичний стиск кубічних зразків В30 показали, що при осьовому стиску відмінності між двома типами армування несуттєві: середня міцність склала 40,51 МПа для зразків зі сталевую та 39,56 МПа для зразків зі скловолоконною арматурою проти 40,8 МПа для контрольних зразків без армування. Розкид значень у межах 3 % свідчить про те, що при центральному стиску тип армування не визначає несучу здатність — вирішальним фактором залишається міцність бетонної матриці. Характер руйнування у всіх трьох серіях є ідентичним: розвиток системи наскрізних похилих тріщин з відколюванням фрагментів по бічних гранях, що відповідає класичній схемі руйнування бетонних кубів при стиску.

Таким чином, проведений порівняльний аналіз дозволяє констатувати: сталева арматура А500С і скловолоконна арматура є принципово різними матеріалами як за механізмами деградації при термічному впливі, так і за характером збереження функціональності після нього. Сталь програє за корозійною стійкістю та питомою міцністю, але зберігає конструктивну цілісність при дії пожежних температур. Скловолоконна арматура поступається за термостійкістю матриці, однак забезпечує еквівалентну сталі несучу здатність при статичному стиску в нормальних умовах. Вибір раціонального типу армування має визначатися комплексом умов експлуатації, де визначальними критеріями є рівень корозійного та температурного впливу протягом проєктного строку служби конструкції.

Висновки за розділом

У четвертому розділі виконано комплекс експериментальних досліджень, що охоплює порівняльний аналіз мікроструктури сталевोї та скловолоконної арматури у стані поставки, механічні випробування залізобетонних зразків на статичний стиск, дослідження впливу високотемпературного нагрівання до 1000 °С на структуру та властивості обох типів арматури, а також електронно-мікроскопічний аналіз із EDX-картографуванням у трьох структурних станах. На підставі отриманих результатів сформульовано такі висновки.

Металографічні дослідження термічно зміцненої арматури класу A500C у стані поставки підтвердили наявність п'яти структурно неоднорідних зон (А–Д) у поперечному перерізі, сформованих у результаті термомеханічного зміцнення: зовнішній шар мартенситу та мартенситу відпуску переходить через проміжні бейнітні зони у феритно-бейнітну серцевину. Товщина зон закономірно залежить від діаметра стержня. Скловолоконна арматура у стані поставки характеризується однорідною будовою без структурної зональності: рівномірно розподілені волокна в суцільній полімерній матриці з чіткою міжфазною межею.

Випробування бетонних кубів розміром 100×100×100 мм класу В30 на статичний стиск показали, що тип центрально розташованого армувального елемента практично не впливає на несучу здатність при осьовому стиску: середня міцність склала 40,8 МПа (без арматури), 40,51 МПа (сталева арматура) та 39,56 МПа (скловолоконна арматура), тобто розкид не перевищує 3 %. Характер руйнування всіх зразків відповідає класичній схемі з розвитком наскрізних тріщин паралельно осі навантаження та відколюванням бетону по бічних гранях, що підтверджує: при центральному стиску визначальним є міцність бетонної матриці, а не тип арматури.

Після нагрівання у складі залізобетонних зразків до 1000 °С з подальшим повільним охолодженням разом із піччю термічно зміцнена арматура A500C повністю втрачає ефект термомеханічного зміцнення: вихідна багатошарова

мартенситно-бейнітна будова замінюється рівноважною ферито-перлітною структурою з укрупненими поліедричними зернами та розвиненими межами зерен фериту. Структурні зміни є наслідком повної аустенітизації сталі та дифузійного розпаду аустеніту при охолодженні, що неминуче призводить до значного зниження механічних характеристик — твердості, межі міцності та межі плинності.

EDX-аналіз сталевий арматури після нагрівання до 1000 °C підтвердив, що хімічний склад металевої основи залишається практично незмінним: вміст Fe становить 86–91 %, марганцю — до 0,62 %, що відповідає складу низьколегованих арматурних сталей. Виявлені структурні зміни є виключно наслідком фазових перетворень, а не хімічної деградації або окислення матеріалу.

Нагрівання скловолоконної арматури до 1000 °C призводить до незворотної термічної деструкції (карбонізації) полімерної матриці: у зонах матриці вміст C підвищується до 54–77 %, O — до 36–42 %, тоді як вміст Si та Ca практично зникає. Армувальні волокна, навпаки, зберігають геометрію та елементний склад, характерний для силікатного скла ($\text{Si} \approx 24,6\%$, $\text{Ca} \approx 17,9\%$, $\text{Al} \approx 6,3\%$), — ці значення залишаються близькими до показників стану поставки. Різке зростання неоднорідності сигналу Si за лінійним профілем (стандартне відхилення 24,5 імп. проти 10,1 імп. у стані поставки) свідчить про руйнування зв'язності матриці та оголення волокон.

Порівняльний аналіз результатів EDX у трьох станах (стан поставки, після витримки в бетоні, після нагрівання) показав, що витримка скловолоконної арматури у складі бетонних зразків протягом 28 діб не призводить до помітних змін елементного складу волокон і матриці — розподіл Si, Ca, Al та C залишається аналогічним стану поставки, що свідчить про хімічну стійкість арматури в лужному середовищі бетону в нормальних умовах.

Встановлено принципово різні механізми деградації двох типів арматури при дії температури 1000 °C: сталева арматура A500C зазнає фазових структурних перетворень з утворенням рівноважного ферито-перлітного стану

і зберігає конструктивну цілісність при зменшеній міцності; скловолоконна арматура втрачає полімерну матрицю внаслідок карбонізації, що руйнує міжфазну взаємодію між волокнами та матрицею і призводить до фактичної втрати здатності армувального елемента спільно сприймати навантаження.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. На основі критичного аналізу понад 100 наукових публікацій, міжнародних стандартів (ACI 440, CSA S806, fib Bulletin 40, ISO 10406) та вітчизняних нормативних документів (ДСТУ 9065:2021, ДСТУ ISO 10406-1:2021) систематизовано сучасний стан досліджень у галузі сталевих та скловолоконного армування залізобетонних конструкцій. Встановлено, що попри підтверджену ефективність GFRP-арматури за критеріями корозійної стійкості та питомої міцності, залишаються недостатньо вивченими кількісні зв'язки між параметрами мікроструктури міжфазних границь волокно–матриця та ефективними пружними і теплофізичними константами в широкому температурному діапазоні, а вітчизняна нормативна база не регламентує поведінку такої арматури в умовах термомеханічного навантаження.

2. Методами оптичної металографії, скануючої електронної мікроскопії та EDX-аналізу встановлено принципову відмінність мікроструктурної організації двох типів арматури у вихідному стані: термічно зміцнена арматура A500C характеризується п'ятизонною концентричною будовою (зони А–Д: відпущений мартенсит → верхній бейніт → перехідна зона → нижній бейніт → ферито-перлітна серцевина), товщина якої закономірно залежить від діаметра стрижня; скловолоконна арматура має однорідну будову з рівномірно розподіленими волокнами діаметром 19–38 мкм у полімерній матриці (С >73 % мас.) без ознак зональності та залишкових дефектів міжфазних границь.

3. Дослідження впливу температурного навантаження (нагрівання до 1000 °С за кривою ISO 834 з подальшим охолодженням разом із піччю) виявило кардинально відмінні механізми деградації: сталева арматура A500C повністю втрачає ефект термомеханічного зміцнення внаслідок аустенітизації та формування рівноважної ферито-перлітної структури з укрупненими зернами при незмінному хімічному складі (Fe 86–91 %, Mn ≤ 0,62 %), зберігаючи конструктивну цілісність; скловолоконна арматура зазнає незворотньої

карбонізації полімерної матриці — вміст С у зонах матриці зростає до 54–77 %, О до 36–42 %, концентрації Si та Са падають нижче 2 %, тоді як армувальні волокна зберігають геометрію та елементний склад (Si 24–27 %, Са 16–18 %, Al 5–7 %), що призводить до повної втрати міжфазного зчеплення та здатності до спільної роботи.

4. Методом RVE-моделювання в ANSYS Material Designer визначено повний набір ефективних інженерних констант (E_1 , E_2 , G_{12} , G_{23} , ν_{12} , ν_{23} , α_1 , α_2 , λ_1 , λ_2) для дев'яти комбінацій скловолокно–матриця (E/AR/S-скло $\times$ вінілестер/бензоксазин/епоксид) при $V_f = 10\text{--}70\%$ та $T = 20\text{--}230\text{ }^\circ\text{C}$. Встановлено, що раціональний діапазон об'ємного вмісту волокон за критерієм мінімального розузгодження КТР арматури та бетонної матриці становить 17–32 % для AR- та E-скла і 17 % для S-скла; найвищу термомеханічну стабільність у діапазоні 20–230 $^\circ\text{C}$ забезпечує комбінація S-скло/бензоксазин завдяки поєднанню мінімального КТР волокна та найвищої температури склування матриці ($T_g = 180\text{--}230\text{ }^\circ\text{C}$).

5. Методом скінченних елементів (ANSYS Workbench: Steady-State Thermal + Static Structural) виконано моделювання температурного поля та термомеханічної поведінки залізобетонних кубів $100\times100\times100$ мм зі сталевую та скловолоконною арматурою при нагріванні за стандартною кривою пожежі ISO 834. Показано, що бетонний захисний шар товщиною 20 мм забезпечує сповільнення прогріву арматури та зниження температури на осі стрижня відносно поверхні конструкції; критична температура деградації GFRP-арматури (T_g матриці) досягається раніше, ніж критична температура для сталі (500–600 $^\circ\text{C}$), що обумовлює меншу вогнестійкість конструкцій з полімерним армуванням.

6. Експериментальні випробування на статичний стиск кубічних зразків B30 ($100\times100\times100$ мм) трьох серій показали, що тип центрально розташованого армувального елемента практично не впливає на міцність бетону при осьовому стиску: середня міцність склала 40,8 МПа (без арматури), 40,51 МПа (сталева арматура A500C) та 39,56 МПа (скловолоконна арматура),

розкид не перевищує 3 %; характер руйнування у всіх серіях ідентичний — розвиток системи наскрізних тріщин із відколюванням фрагментів по бічних гранях, що підтверджує визначальну роль бетонної матриці в сприйнятті осьового стискального навантаження та рівноцінність двох типів армування за цим критерієм.

7. Отримані результати створюють науково обґрунтовану експериментально-теоретичну базу для застосування скловолоконної арматури в залізобетонних конструкціях і дають підстави для конкретних практичних рекомендацій: використання комбінації AR-скло/бензоксазин з $V_f = 20\text{--}25\%$ як оптимальної за критеріями термомеханічної сумісності з бетоном та вогнестійкості; забезпечення збільшеного захисного шару бетону (≥ 30 мм) для конструкцій з підвищеними вимогами до вогнестійкості; урахування в нормативних документах критичного температурного порогу деградації GFRP-арматури на рівні $0,8 \cdot T_g$ матриці як граничного стану при розрахунку вогнестійкості залізобетонних конструкцій.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Bakis C. E., Bank L. C., Brown V. L., Cosenza E., Davalos J. F., Lesko J. J., Machida A., Rizkalla S. H., Triantafillou T. C. Fiber-reinforced polymer composites for construction – state-of-the-art review. *Journal of Composites for Construction*. 2002. Vol. 6, № 2. P. 73–87. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0268(2002)6:2(73).
2. Hollaway L. C. A review of the present and future utilisation of FRP composites in the civil infrastructure with reference to their important in-service properties. *Construction and Building Materials*. 2010. Vol. 24, № 12. P. 2419–2445. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2010.04.062.
3. Nanni A., De Luca A., Zadeh H. J. Reinforced concrete with FRP bars: mechanics and design. Boca Raton : CRC Press, 2014. 397 p.
4. Ali M., Shams M. A., Bheel N., Almaliki A. H., Mahmoud A. S., Dodo Y. A., Benjeddou O. A review on chloride induced corrosion in reinforced concrete structures: lab and in situ investigation. *RSC Advances*. 2024. Vol. 14, № 50. P. 37252–37271. DOI: 10.1039/D4RA05506C.
5. Bertolini L. Steel corrosion and service life of reinforced concrete structures. *Structure and Infrastructure Engineering*. 2008. Vol. 4, № 2. P. 123–137.
6. Ribeiro F., Correia L., Sena-Cruz J. Hybridization in FRP composites for construction: state-of-the-art review and trends. *Journal of Composites for Construction*. 2024. Vol. 28, № 4. DOI: 10.1061/JCCOF2.CCENG-4486.
7. Zaman A., Gutub S. A., Wafa M. A. A review on FRP composites applications and durability concerns in the construction sector. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2013. Vol. 32, № 24. P. 1966–1988. DOI: 10.1177/0731684413492868.
8. ACI 440.1R-15. Guide for the design and construction of structural concrete reinforced with fiber-reinforced polymer (FRP) bars. Farmington Hills, MI : American Concrete Institute, 2015. 88 p.

9. Nkurunziza G., Debaiky A., Cousin P., Benmokrane B. Durability of GFRP bars: a critical review of the literature. *Progress in Structural Engineering and Materials*. 2005. Vol. 7, № 4. P. 194–209. DOI: 10.1002/pse.205.
10. Micelli F., Nanni A. Durability of FRP rods for concrete structures. *Construction and Building Materials*. 2004. Vol. 18, № 7. P. 491–503. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2004.04.012.
11. AASHTO LRFD bridge design guide specifications for GFRP-reinforced concrete. 2nd ed. Washington, D.C. : American Association of State Highway and Transportation Officials, 2018.
12. Gooranorimi O., Nanni A. GFRP reinforcement in concrete after 15 years of service. *Journal of Composites for Construction*. 2017. Vol. 21, № 5. DOI: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000806.
13. Mohamed O. A., Al Hawat W., Keshawarz M. Durability and mechanical properties of concrete reinforced with basalt fiber-reinforced polymer (BFRP) bars: towards sustainable infrastructure. *Polymers*. 2021. Vol. 13, № 9. Article 1402. DOI: 10.3390/polym13091402.
14. Elgabbas F., Ahmed E. A., Benmokrane B. Physical and mechanical characteristics of new basalt-FRP bars for reinforcing concrete structures. *Construction and Building Materials*. 2015. Vol. 95. P. 623–635. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.07.036.
15. Benmokrane B., El-Salakawy E., El-Ragaby A., Lackey T. Designing and testing of concrete bridge decks reinforced with glass FRP bars. *Journal of Bridge Engineering*. 2006. Vol. 11, № 2. P. 217–229. DOI: 10.1061/(ASCE)1084-0702(2006)11:2(217).
16. CSA S806-12 (R2021). Design and construction of building structures with fibre-reinforced polymers. Toronto : Canadian Standards Association, 2012. 208 p.
17. CSA S807-19. Specification for fibre-reinforced polymers. Toronto : Canadian Standards Association, 2019. 44 p.

18. Benmokrane B., Ali A. H., Mohamed H. M., ElSafty A., Manalo A. Field durability study of vinyl-ester-based GFRP rebars in concrete bridge barriers. *Journal of Bridge Engineering*. 2018. Vol. 23, № 12. DOI: 10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001315.
19. ACI 440.3R-12. Guide test methods for fiber-reinforced polymers (FRPs) for reinforcing or strengthening concrete structures. Farmington Hills, MI : American Concrete Institute, 2012. 23 p.
20. fib Bulletin 40. FRP reinforcement in RC structures. Lausanne : Fédération internationale du béton (fib), 2007. 160 p.
21. fib Model Code for Concrete Structures 2010. Berlin : Ernst & Sohn, 2013. 434 p.
22. Rifai M. A., El-Hassan H., El-Maaddawy T., Abed F. Durability of basalt FRP reinforcing bars in alkaline solution and moist concrete environments. *Construction and Building Materials*. 2020. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118258.
23. JSCE. Recommendation for design and construction of concrete structures using continuous fiber reinforcing materials / ed. by A. Machida. Tokyo : Japan Society of Civil Engineers, 1997. (Concrete Engineering Series 23).
24. Venigalla S. G., Nabilah A. B., Mohd Nasir N. A., Safiee N. A., Abd Aziz F. N. A. Textile-reinforced concrete as a structural member: a review. *Buildings*. 2022. Vol. 12, № 4. Article 474. DOI: 10.3390/buildings12040474.
25. Wu C., Pan Y., Yan L. Mechanical properties and durability of textile reinforced concrete (TRC) – a review. *Polymers*. 2023. Vol. 15, № 18. DOI: 10.3390/polym15183826.
26. Brameshuber W. (ed.). Textile reinforced concrete – State-of-the-art report of RILEM TC 201-TRC. Bagneux : RILEM Publications, 2006. 292 p.
27. Silva R. M. C., Silva F. A. Carbon textile reinforced concrete: materials and structural analysis. *Materials and Structures*. 2020. Vol. 53, № 1. DOI: 10.1617/s11527-020-1448-4.

28. Lloret E., Shahab A. R., Linus M., Flatt R. J., Gramazio F., Kohler M., Langenberg S. Complex concrete structures: merging existing casting techniques with digital fabrication. *Computer-Aided Design*. 2015. Vol. 60. P. 40–49. DOI: 10.1016/j.cad.2014.02.011.
29. Szabo A., Reiter L., Lloret-Fritschi E., Gramazio F., Kohler M., Flatt R. J. Mastering yield stress evolution and formwork friction for smart dynamic casting. *Materials*. 2020. Vol. 13, № 9. Article 2084. DOI: 10.3390/ma13092084.
30. Lloret-Fritschi E., Reiter L., Wangler T. et al. From smart dynamic casting to a growing family of digital casting systems. *Cement and Concrete Research*. 2020. Vol. 134. Article 106071. DOI: 10.1016/j.cemconres.2020.106071.
31. Zeng J.-J., Feng S.-Z., Zhao B., Wu F.-Y., Zhuge Y., Wang H. Recyclable thermoplastic FRP bars for reinforced concrete structures: current status and future opportunities. *Composite Structures*. 2024. DOI: 10.1016/j.compstruct.2024.118438.
32. El-Tahan M., Galal K., Hoa V. S. New thermoplastic CFRP bendable rebars for reinforcing structural concrete elements. *Composites Part B: Engineering*. 2013. Vol. 45, № 1. P. 1207–1215. DOI: 10.1016/j.compositesb.2012.09.025.
33. Benmokrane B., Mousa S., Mohamed K., Sayed-Ahmed M. Physical, mechanical, and durability characteristics of newly developed thermoplastic GFRP bars for reinforcing concrete structures. *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 276. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.122200.
34. Wu G., Sun Z. Y., Wu Z. S., Luo Y. B. Mechanical properties of steel-FRP composite bars (SFCBs) and performance of SFCB reinforced concrete structures. *Advances in Structural Engineering*. 2012. Vol. 15, № 4. P. 625–635. DOI: 10.1260/1369-4332.15.4.625.
35. Sun Z.-Y., Wu G., Wu Z.-S., Zhang M. Seismic behavior of concrete columns reinforced by steel-FRP composite bars. *Journal of Composites for Construction*. 2011. Vol. 15, № 5. DOI: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000199.

36. Su C., Wang X., Ding L., Chen Z., Liu S., Wu Z. Experimental study on the seismic behavior of seawater sea sand concrete beams reinforced with steel-FRP composite bars. *Engineering Structures*. 2021. Vol. 248. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.113269.
37. Dziomdziora P., Smarzewski P. Reinforced concrete beams with FRP and hybrid steel–FRP composite bars: load–deflection response, failure mechanisms, and design implications. *Materials*. 2025. DOI: 10.3390/ma18184381.
38. Di B., Wang J., Li H., Zheng J., Zheng Y., Song G. Investigation of bonding behavior of FRP and steel bars in self-compacting concrete structures using acoustic emission method. *Sensors*. 2019. Vol. 19, № 1. DOI: 10.3390/s19010159.
39. Blikharsky Z., Kopyika N., Khmil R., Selejdak J., Blikharsky Y. Application of the digital image correlation method for study of the stress–strain state of reinforced concrete structures. *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12, № 19.
40. ISO 10406-1:2015. Fibre-reinforced polymer (FRP) reinforcement of concrete – Test methods – Part 1: FRP bars and grids. Geneva : International Organization for Standardization, 2015. 28 p.
41. Pecce M., Manfredi G., Cosenza E. Experimental response and code models of GFRP RC beams in bending. *Journal of Composites for Construction*. 2000. Vol. 4, № 4. P. 182–190. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0268(2000)4:4(182).
42. Inman M., Thorhallsson E. R., Azrague K. A mechanical and environmental assessment and comparison of basalt fibre reinforced polymer (BFRP) rebar and steel rebar in concrete beams. *Energy Procedia*. 2017. Vol. 111. P. 31–40. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.03.005.
43. Tran H., Nguyen-Thoi T. Flexural behavior of beams reinforced with FRP bars: test database, design guideline assessment, and reliability evaluation. *Buildings*. 2025. DOI: 10.3390/buildings15183373.
44. El-Nemr A., Ahmed E. A., Benmokrane B. Flexural behavior and serviceability of normal- and high-strength concrete beams reinforced with glass fiber-

- reinforced polymer bars. *ACI Structural Journal*. 2013. Vol. 110, № 6. P. 1077–1088.
45. Mohtaj Khorasani A. M., Esfahani M. R., Sabzi J. Effect of transverse and flexural reinforcement on deflection and cracking of GFRP bar reinforced concrete beams. *Composites Part B: Engineering*. 2019. Vol. 161. P. 530–546. DOI: 10.1016/j.compositesb.2018.12.127.
 46. Tran H., Nguyen-Thoi T., Dinh H.-B. State-of-the-art review of studies on the flexural behavior and design of FRP-reinforced concrete beams. *Materials*. 2025. DOI: 10.3390/ma18143295.
 47. Li G., Zhao J., Wang Z. Fatigue behavior of glass fiber-reinforced polymer bars after elevated temperatures exposure. *Materials*. 2018. Vol. 11, № 6. DOI: 10.3390/ma11061028.
 48. Tanks J., Naito K., Ueda H. Characterization of the static, creep, and fatigue tensile behavior of basalt fiber/polypropylene composite rods for passive concrete reinforcement. *Polymers*. 2021. Vol. 13, № 18. DOI: 10.3390/polym13183136.
 49. Nagy I. E., Asadian A., Galal K. Effect of stress ratio on the fatigue behavior of ribbed glass fiber-reinforced polymer bars for concrete reinforcement. *Journal of Composites for Construction*. 2026. Vol. 30, № 2. DOI: 10.1061/JCCOF2.CCENG-5307.
 50. Dinh N. H., Roh Y.-S., Truong G. T. Shear strength model of FRP-reinforced concrete beams without shear reinforcement. *Structures*. 2024. DOI: 10.1016/j.istruc.2024.106520.
 51. Gu Z., Hu Y., Gao D., Wang T., Yang L. Shear behavior and strength prediction of HFRP reinforced concrete beams without stirrups. *Engineering Structures*. 2023. Vol. 297. DOI: 10.1016/j.engstruct.2023.117030.
 52. Laoubi K., El-Salakawy E., Benmokrane B. Creep and durability of sand-coated glass FRP bars in concrete elements under freeze/thaw cycling and sustained loads. *Cement and Concrete Composites*. 2006. Vol. 28, № 10. P. 869–878. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2006.07.014.

53. Wang H., Wu L., Xu X., Lin Z. Experimental study on bond durability of GFRP bar/engineered cementitious composite exposed to freeze-thaw environments. *Journal of Building Engineering*. 2024. DOI: 10.1016/j.jobbe.2024.108592.
54. Chen Y., Davalos J. F., Ray I., Kim H.-Y. Accelerated aging tests for evaluations of durability performance of FRP reinforcing bars for concrete structures. *Composite Structures*. 2007. Vol. 78, № 1. P. 101–111. DOI: 10.1016/j.compstruct.2005.08.015.
55. Davalos J. F., Chen Y., Ray I. Long-term durability prediction models for GFRP bars in concrete environment. *Journal of Composite Materials*. 2012. Vol. 46, № 16. P. 1899–1914. DOI: 10.1177/0021998311427777.
56. Rolland A., Benzarti K., Quiertant M., Chataigner S. Accelerated aging behavior in alkaline environments of GFRP reinforcing bars and their bond with concrete. *Materials*. 2021. Vol. 14, № 19. Article 5700. DOI: 10.3390/ma14195700.
57. Jin Q., Chen P., Gao Y., Du A., Liu D., Sun L. Tensile strength and degradation of GFRP bars under combined effects of mechanical load and alkaline solution. *Materials*. 2020. Vol. 13, № 16. DOI: 10.3390/ma13163533.
58. Robert M., Benmokrane B. Combined effects of saline solution and moist concrete on long-term durability of GFRP reinforcing bars. *Construction and Building Materials*. 2013. Vol. 38. P. 274–284. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.08.021.
59. Ahmed A., Guo S., Zhang Z., Shi C., Zhu D. A review on durability of fiber reinforced polymer (FRP) bars reinforced seawater sea sand concrete. *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 256. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119484.
60. Wang D., Gong Q., Yuan Q., Luo S. Review of the properties of fiber-reinforced polymer-reinforced seawater–sea sand concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2021. Vol. 33, № 10. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003894.
61. Wu W., He X., Yang W., Wei B., Alam M. S. Durability and microstructure degradation mechanism of FRP-seawater sea-sand concrete structures: a review.

- Construction and Building Materials. 2023. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.131825.
62. Robert M., Benmokrane B. Behavior of GFRP reinforcing bars subjected to extreme temperatures. *Journal of Composites for Construction*. 2010. Vol. 14, № 4. P. 353–360. DOI: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000092.
 63. Alkhraisha H., Mhanna H., Tello N., Abed F. Serviceability and flexural behavior of concrete beams reinforced with basalt fiber-reinforced polymer (BFRP) bars exposed to harsh conditions. *Polymers*. 2020. Vol. 12, № 9. DOI: 10.3390/polym12092110.
 64. Mufti A. A., Onofrei M., Benmokrane B. et al. Field study of glass-fibre-reinforced polymer durability in concrete. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 2007. Vol. 34, № 3. P. 355–366. DOI: 10.1139/106-138.
 65. Zhang J., Yang J., Yu T. Durability of FRP bars and FRP-reinforced concrete beams: a critical review of accelerated aging tests and performance insights. *Composites Part B: Engineering*. 2026. DOI: 10.1016/j.compositesb.2025.112965.
 66. Baena M., Torres L., Turon A., Barris C. Experimental study of bond behaviour between concrete and FRP bars using a pull-out test. *Composites Part B: Engineering*. 2009. Vol. 40, № 8. P. 784–797. DOI: 10.1016/j.compositesb.2009.07.003.
 67. Gentry T. R., Husain M. Thermal compatibility of concrete and composite reinforcements. *Journal of Composites for Construction*. 1999. Vol. 3, № 2. P. 82–86. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0268(1999)3:2(82).
 68. Yan F., Lin Z., Yang M. Bond mechanism and bond strength of GFRP bars to concrete: a review. *Composites Part B: Engineering*. 2016. Vol. 98. P. 56–69. DOI: 10.1016/j.compositesb.2016.04.068.
 69. Nepomuceno E., Sena-Cruz J., Correia L., D’Antino T. Review on the bond behavior and durability of FRP bars to concrete. *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 287. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123042.

70. Gouda O., Asadian A., Galal K. Flexural and serviceability behavior of concrete beams reinforced with ribbed GFRP bars. *Journal of Composites for Construction*. 2022. Vol. 26, № 5. DOI: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0001253.
71. Başaran B., Kalkan İ., Beycioglu A., Kasprzyk I. A review on the physical parameters affecting the bond behavior of FRP bars embedded in concrete. *Polymers*. 2022. Vol. 14, № 9. DOI: 10.3390/polym14091796.
72. Kakhki S. A. E., Kheyroddin A. Bond behavior of fiber reinforced polymer bars in concrete: a review. *International Journal of Concrete Structures and Materials*. 2025. DOI: 10.1186/s40069-025-00859-0.
73. Zhou Y., Wu G., Li L., Guan Z., Guo M., Yang L., Li Z. Experimental investigations on bond behavior between FRP bars and advanced sustainable concrete. *Polymers*. 2022. Vol. 14, № 6. DOI: 10.3390/polym14061132.
74. Belarbi A., Wang H. Bond durability of FRP bars embedded in fiber-reinforced concrete. *Journal of Composites for Construction*. 2012. Vol. 16, № 4. P. 371–380. DOI: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000270.
75. Kodur V. Properties of concrete at elevated temperatures. *ISRN Civil Engineering*. 2014. Vol. 2014. Article ID 468510. DOI: 10.1155/2014/468510.
76. Ellis D., Tabatabai H., Nabizadeh A. Residual tensile strength and bond properties of GFRP bars after exposure to elevated temperatures. *Materials*. 2018. Vol. 11, № 3. DOI: 10.3390/ma11030346.
77. Hajiloo H., Green M. F., Gales J. Mechanical properties of GFRP reinforcing bars at high temperatures. *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 162. P. 142–154. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.12.025.
78. Spagnuolo S., Meda A., Rinaldi Z., Nanni A. Residual behaviour of glass FRP bars subjected to high temperatures. *Composite Structures*. 2018. Vol. 203. P. 886–893. DOI: 10.1016/j.compstruct.2018.07.077.
79. Li T., Zhu H., Shen J., Keller T. Thermophysical and thermomechanical properties of basalt-phenolic FRP rebars under high temperature. *Construction and Building Materials*. 2022. Vol. 342. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127983.

80. Protchenko K. Residual fire resistance testing of basalt- and hybrid-FRP reinforced concrete beams. *Materials*. 2022. Vol. 15, № 4. DOI: 10.3390/ma15041509.
81. Zhao J., Pan H., Wang Z., Li G. Experimental and theoretical study on flexural behavior of GFRP- and CFRP-reinforced concrete beams after high-temperature exposure. *Polymers*. 2022. Vol. 14, № 19. DOI: 10.3390/polym14194002.
82. Najafabadi E. P., Vatani Oskouei A., Houshmand Khaneghahi M., Shoaie P., Ozbakkaloglu T. The tensile performance of FRP bars embedded in concrete under elevated temperatures. *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 211. P. 1138–1152. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.239.
83. Ghazal Aswad N., Al Dawood M., Abed F. Effects of elevated temperature on basalt and glass FRP bars in prismatic concrete beams under flexural loading. *Composites Part C: Open Access*. 2025. DOI: 10.1016/j.jcomc.2025.100616.
84. Nigro E., Cefarelli G., Bilotta A., Manfredi G., Cosenza E. Fire resistance of concrete slabs reinforced with FRP bars. Part I: experimental investigations on the mechanical behavior. *Composites Part B: Engineering*. 2011. Vol. 42, № 6. P. 1739–1750. DOI: 10.1016/j.compositesb.2011.02.025.
85. ДСТУ 3760:2019. Прокат арматурний для залізобетонних конструкцій. Загальні технічні умови. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2019. 22 с.
86. ДБН В.2.6-98:2009. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення. Київ : Мінрегіонбуд України, 2011.
87. ДСТУ Б В.2.6-156:2010. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування. Київ : Мінрегіонбуд України, 2011.
88. ДСТУ Б В.2.6-185:2012. Настанова з проектування та виготовлення бетонних конструкцій з неметалевою композитною арматурою на основі базальто- і склоровінгу. Київ : Мінрегіонбуд України, 2012.

89. ДСТУ Б В.2.7-312:2016. Арматура неметалева композитна базальтова періодичного профілю. Загальні технічні умови. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016.
90. ДСТУ 9065:2021. Арматура композитна для армування бетонних конструкцій. Загальні технічні умови. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2021. 34 с.
91. ДСТУ ISO 10406-1:2021 (ISO 10406-1:2015, IDT). Арматура композитна. Методи випробування. Частина 1. Стрижні та решітки. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2021. 48 с.
92. Koptika N., Blikharsky Y. Effectiveness of strengthening of reinforced concrete beams with the use of composite materials. *Theory and Building Practice*. 2022. № 2. С. 7–16. DOI: 10.23939/jtbp2022.02.007.
93. Bobalo T., Blikharsky Y., Selejdak J., Koptika N., Blikharsky Z. Concrete beams reinforced with high-strength rebar in combination with external steel tape. *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13, № 5. DOI: 10.3390/app13052950.
94. Blikharsky Y., Brózda K., Selejdak J. Effectiveness of strengthening loaded RC beams with FRCM system. *Archives of Civil Engineering*. 2018. Vol. 64, № 3. P. 3–13. DOI: 10.2478/ace-2018-0027.
95. Ромашко В. М. Деформаційно-силова модель опору бетону та залізобетону : монографія. Рівне : НУВГП, 2016. 424 с.
96. Карпюк В. М., Кlymenko Ye. V. та ін. Розрахункові моделі опору залізобетонних елементів : монографія. Одеса : ОДАБА, 2021.
97. Khmil R., Blikharsky R., Vashkevych R., Blikharsky Z. Study of the crack resistance of reinforced concrete columns strengthened by CFRP. *Lecture Notes in Civil Engineering*. Cham : Springer, 2023.
98. Koptika N., Selejdak J., Blikharsky Y. CFRP materials for restoration of the bearing capacity of RC beams with damaged rebar. *Journal of Engineering*. 2024. Article 4915391. DOI: 10.1155/2024/4915391.
99. Blikharsky Z., Selejdak J., Koptika N. Experimental study of crack resistance and shear strength of single-span reinforced concrete beams under a concentrated

- load at $a/d = 1$. Lecture Notes in Civil Engineering. Cham : Springer, 2020. Vol. 47. P. 285–292. DOI: 10.1007/978-3-030-27011-7_34.
100. Ромашко В. М., Ромашко О. В. Розрахунок залізобетонних елементів і конструкцій за деформаційно-силовою моделлю : рекомендації. Рівне : НУВГП, 2016. 116 с.
 101. ДСТУ EN ISO 6892-1:2019. Матеріали металеві. Випробування на розтяг. Частина 1. Метод випробування при кімнатній температурі. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2019. 78 с.
 102. ДСТУ ISO 6507-1:2018. Матеріали металеві. Вимірювання твердості за Віккерсом. Частина 1. Метод випробування. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2018. 30 с.
 103. ДСТУ EN 10080:2015. Сталь для армування бетону. Зварювальна арматурна сталь. Загальні положення. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2015. 60 с.
 104. ДСТУ EN 12390-3:2015. Випробування бетону. Частина 3. Міцність бетону на стиск зразків для випробування. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2015. 18 с.
 105. ISO 834-1:1999. Fire-resistance tests — Elements of building construction — Part 1: General requirements. Geneva: ISO, 1999. 25 p.
 106. ДСТУ 9062:2020. Арматура неметалева композитна для дорожніх та мостових конструкцій. Методи випробування. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2020. 40 с.
 107. Benmokrane B., Manalo A., Bouhet J.-C. et al. Effects of diameter on the durability of glass fiber-reinforced polymer bars conditioned in alkaline solution. Journal of Composites for Construction. 2017. Vol. 21, № 5. P. 04017040. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000803](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000803)
 108. Li Y., Wang F., Zhang X. Temperature-dependent mechanical properties of glass fiber reinforced polymer composites. Composites Part B: Engineering. 2020. Vol. 183. P. 107673. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107673>
 109. Gibson R.F. Principles of Composite Material Mechanics. 4th ed. Boca Raton: CRC Press, 2019. 700 p.

110. Composite Design and Analysis: Theory and Applications / Ed. by H.T. Hahn. Lancaster: DEStech Publications, 2021. 520 p.
111. ANSYS Inc. ANSYS Material Designer Users Guide. Release 2023 R1. Canonsburg: ANSYS Inc., 2023. 210 p.
112. ДСТУ EN 12390-2:2015. Випробування бетону. Частина 2. Виготовлення та витримування зразків для випробувань на міцність. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2015. 22 с.

ДОДАТОК А

Список публікацій здобувача за темою дисертації

*Статті в наукових періодичних виданнях, включених до переліку
наукових фахових видань України (категорія Б)*

1. Пілюгін Є.Д., Ротт Н.О. Перспективи застосування композитної арматури в будівельній галузі // Вісник ХНАДУ. – 2024. – №107. – С. 62–68. DOI: <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2024.107.0.62>.

Особистий внесок: виконано порівняльний аналіз властивостей неметалевої композитної та сталевий арматури, досліджено переваги GFRP щодо корозійної стійкості та питомої ваги, обґрунтовано перспективи застосування композитної арматури в сучасному будівництві.

2. Пілюгін Є.Д., Ротт Н.О. Вплив температури на поведінку композитобетону: чисельне моделювання // Вісник ХНАДУ. – 2025. – №110. С. 24–32. DOI: <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2025.110.0.24>.

Особистий внесок: розроблено числову модель у середовищі ANSYS для оцінювання вогнестійкості бетонних конструкцій зі скловолоконною арматурою за стандартною кривою пожежі ISO 834; встановлено критичні температурні діапазони деградації матеріалів та оцінено ефективність захисного шару бетону.

3. Пілюгін Є.Д. Methodological principles for selecting glass fiber composite materials in reinforced structures // Збірник наукових праць НТУ «ДП». – 2025. – №83. – С. 183-191.. DOI: <https://doi.org/10.33271/crpnmu/83.183>.

Особистий внесок: виконано порівняльний аналіз сталевий та скловолоконної арматур на мікроструктурному рівні із застосуванням мікромеханічного моделювання; обґрунтовано вибір волокон типу S та AR і модифікацію матриці як засоби підвищення термічних та механічних характеристик композиту.

4. Ali M., Shams M. A., Bheel N., Almaliki A. H., Mahmoud A. S., Dodo Y. A., Benjeddou O. A review on chloride induced corrosion in reinforced concrete structures: lab and in situ investigation. RSC Advances. 2024. Vol. 14, № 50. P. 37252–37271. DOI: 10.1039/D4RA05506C. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2026-40-014>

Особистий внесок: самостійно розроблено інтегровану модель, що одночасно враховує теплові, механічні та мікроструктурні фактори; показано вирішальну роль мікроструктури міжфазних границь у забезпеченні термостійкості та опору втомі GFRP-арматури в бетонних елементах.

Публікації, що засвідчують апробацію матеріалів дисертації

5. Пілюгін, Є. Д., Ротт, Н. О., Бодряхо, Є. А. (2023). Effect of the use of hard round polymer rods reinforced with fiberglass on the strength and durability of concrete structures. Розробка та дизайн сучасних матеріалів та виробів: збірник наукових праць II міжнародної науково-практичної конференції (м. Дніпро, Україна, 9–10 листопада 2023 р.) (с. 66–67). URL: https://okmm.nmu.org.ua/en/files/2023/DDMMP_2023.Conference_Proceedings.pdf *(Тези доповіді)*

6. Ribeiro F., Correia L., Sena-Cruz J. Hybridization in FRP composites for construction: state-of-the-art review and trends. Journal of Composites for Construction. 2024. Vol. 28, № 4. DOI: 10.1061/JCCOF2.CCENG-4486. <https://okmm.nmu.org.ua/ua/files/2024/%D0%97%D0%B1%D1%96%D1%80%D0%BD%D0%B8%D0%BA%20%D1%82%D0%B5%D0%B7%202024.pdf>

7. Пілюгін, Є. Д. (2025). Перспективи застосування композитної неметалевої арматури на основі склоровінгу в будівельній галузі. Наукова весна 2025: матеріали XV Міжнародної науково-технічної конференції аспірантів та молодих вчених (м. Дніпро, Україна, 26–28 березня 2025 р.) (с. 429–430). URL: https://rmv.nmu.org.ua/ua/arkhiv-zbirok-konferentsiy/naukova-vesna-2025/Scientific_Spring_2025.pdf *(Тези доповіді)*

8. Пілюгін, Є. Д., Ротт, Н. О. (2025). До методики експерименту дослідження розподілу температури у середовищі з особливостями. Сучасні проблеми механіки у конструкціях спеціального призначення: збірник матеріалів міжнародної науково-технічної конференції (м. Дніпро, Україна, 26–28 березня 2025 р.) (с. 252–254). URL: https://science.nmu.org.ua/ua/conferences/Forum_Mechanic/Zbirnyk_19_05-01.pdf *(Тези доповіді)*

9. Пілюгін, Є. Д., Лаухін, Д. В. (2026). Структурні особливості будови міжфазних границь між матрицею та волокнами в композитній арматурі. Наукова весна 2026: матеріали XVI Міжнародної науково-технічної конференції аспірантів та молодих вчених (м. Дніпро, Україна, 4–6 березня 2026 р.) (с. 537–538). https://rmv.nmu.org.ua/ua/arkhiv-zbirok-konferentsiy/naukova-vesna-2026/Scientific_Spring_2026.pdf (Тези доповіді)

ДОДАТОК Б

Акти впровадження та використання результатів дисертаційного дослідження

ЗАТВЕРДЖУЮ
Перший проректор

НТУ «Дніпровська політехніка»
Артем ПАВЛИЧЕНКО



АКТ

**впровадження результатів дисертаційного дослідження
аспіранта Пілюгіна Є.Д.
в навчальний процес кафедри конструювання, технічної естетики і
дизайну**

Наукові та науково-практичні результати теми (Вплив структуроутворення міжфазних границь скловолоконних армуючих елементів на механічні та експлуатаційні властивості композитних будівельних конструкцій) впроваджені у 2025 році у навчальному процесі на кафедрі конструювання технічної естетики і дизайну при публікацію методичних вказівок до виконання лабораторних робіт для здобувачів ступеня магістра: «Методи прогнозування властивостей матеріалів і виробів» [доцент З.В. Сазанішвілі, асистент Є.Д. Пілюгін Дніпро: НТУ «ДП», 2025.]; «Фізичні властивості і методи дослідження матеріалів» [проф. Д.В. Лаухін, доцент З.В. Сазанішвілі, асистент Є.Д. Пілюгін Дніпро: НТУ «ДП», 2025.]; «Кваліметрія та контроль якості матеріалів і виробів» [доцент З.В. Сазанішвілі, О.В. Федоскіна, асистент Є.Д. Пілюгін Дніпро: НТУ «ДП», 2025.];

Завідувач кафедри конструювання
технічної естетики і дизайну
Аспірант кафедри конструювання
технічної естетики і дизайну

Сергій ФЕДОРЯЧЕНКО

Євгеній ПІЛЮГІН

ЗАТВЕРДЖУЮ:

засновник

(посада, вчене звання)

ТОВ «Сінерджі ЕР ЕНД ДІ»

(найменування установи)

КРАВЕЦЬ Володимир

(підпис)

І.к. 39434301 (ПІБ)

« ____ »

ЗАТВЕРДЖУЮ:

проректор з наукової роботи

(посада, вчене звання)

НТУ «Дніпровська політехніка»

(найменування установи)

Гор Кімітень

(підпис) (ПІБ)

2026 р.

АКТ

впровадження результатів дисертаційного дослідження на тему: «Вплив структуроутворення міжфазних границь скловолоконних армуючих елементів на механічні та експлуатаційні властивості композитних будівельних конструкцій», виконаного аспірантом Пілюгіним Євгенієм Дмитровичем (НТУ «Дніпровська політехніка», кафедра конструювання, технічної естетики і дизайну;

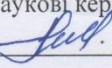
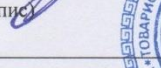
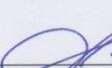
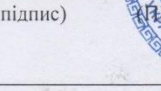
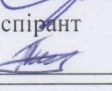
наукові керівники — д.т.н., проф. Лаухін Д.В., к.т.н., доц. Федоряченко С.О.).

У результаті проведеного дослідження було встановлено закономірності структуроутворення та зміни мікроструктури сталеві арматури класу А500С та композитної скловолоконної (GFRP) арматури при впливі підвищених температур. Визначено вплив температури на деградацію механічних властивостей полімерної матриці та стан міжфазних границь волокно–матриця в композитній арматурі.

Методами чисельного моделювання визначено ефективні інженерні константи композитних матеріалів на основі скловолокна різних типів та полімерних матриць, обґрунтовано вибір оптимального складу армуючого елемента за критерієм термомеханічної сумісності з бетонною матрицею, встановлено закономірності зміни коефіцієнта теплового розширення та пружних характеристик при нагріванні.

Проведено експериментальне дослідження механічної поведінки залізобетонних елементів зі сталевим та композитним армуванням при статичному стиску. Встановлено вплив типу армування на несучу здатність та характер руйнування бетонних зразків, виявлено відмінності у морфології та розвитку тріщиноутворення.

Цим актом підтверджується впровадження у практику спільних науково-практичних розробок з цієї роботи, а також використання матеріалів дисертаційної роботи здобувача НТУ «Дніпровська політехніка» та ТОВ СРД.

Від Підприємства:	Від НТУ «Дніпровська політехніка»:
(підпис)  КРАВЕЦЬ Володимир	Наукові керівники, д.т.н., проф.  Лаухін Д.В.
(підпис)  КРАВЕЦЬ Володимир	к.т.н., доц.  Федоряченко С.О.
(підпис)  ПІЛЮГІН С.Д.	Аспірант  Пілюгін С.Д.