

УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

Муригіна Надія Олександрівна

УДК 691.328.5

ДИСЕРТАЦІЯ

**ДИСПЕРСНО-АРМОВАНИЙ МАТЕРІАЛ ДЛЯ ПРОКЛАДНОГО
ШАРУ ЗАЛІЗНИЧНОГО БЕЗБАЛАСТНОГО МОСТОВОГО ПОЛОТНА**

Спеціальність – 192 Будівництво та цивільна інженерія

Галузь знань – 19 Архітектура та будівництво

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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

 Н.О. Муригіна

Науковий керівник:
Плугін Андрій Аркадійович,
доктор технічних наук, професор

Харків – 2025

АНОТАЦІЯ

Муригіна Н.О. Дисперсно-армований матеріал для прокладного шару залізничного безбаластного мостового полотна. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії (PhD) за спеціальністю – 192 Будівництво та цивільна інженерія. – Український державний університет залізничного транспорту, Харків, 2025.

Дисертація виконана на кафедрі залізничної колії і транспортних споруд Українського державного університету залізничного транспорту і складається зі вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку із 107 джерел, 6 додатків.

У **вступі** наведено загальну характеристику роботи, зокрема, доведено актуальність обраної теми, показано її зв'язок з науковими програмами та планами, сформульовано мету, об'єкт і предмет, завдання досліджень, викладено положення наукової новизни, обґрунтовано достовірність і практичне значення отриманих результатів, наведено дані про їх апробацію. На більшості металевих мостів улаштовується безбаластне мостове полотно на залізобетонних плитах, яке укладається на металеві балки прогонових будов. Елементом сполучення плит БМП з балками є гумодерев'яний прокладний шар. Його перевагами є простота і технологічність. Проте він має невисоку довговічність і через біологічні пошкодження деревини з втратою нею фізико-механічних властивостей може спричинити швидкі розлади колії. Через це розробка нового довговічного швидкотверднучого композиційного матеріалу і конструктивно-технологічного рішення прокладного шару під БМП із нього є актуальними завданнями. Актуальність підкреслюється виконанням досліджень у складі держбюджетних науково-дослідних робіт МОН України.

Метою дослідження є створення дисперсно-армованого композиційного матеріалу на основі цементу і поліефірних волокон,

придатного за фізико-механічними властивостями для прокладного шару залізничного безбаластного мостового полотна. **Предмет досліджень** – дисперсно-армований композиційний матеріал на основі цементу і поліефірних волокон для прокладного шару залізничного безбаластного мостового полотна, **об'єкт досліджень** – фізико-механічні, у т.ч. деформативні властивості дисперсно-армованого композиційного матеріалу на основі цементу і поліефірних волокон і процес їх формування. Завдання досліджень: аналіз конструкції, технології улаштування і особливостей експлуатації прокладного шару між безбаластним мостовим полотном із залізобетонних плит і подовжніми балкам залізничних металевих мостів, аналітичний огляд в'яжучих речовин і волокон, придатних для створення дисперсно-армованого композиційного матеріалу на основі цементів для прокладного шару; аналіз хімічного складу, структури, технології отримання, електроповерхневих властивостей волокон для дисперсного армування на предмет взаємодії з продуктами гідратації цементів; аналіз електроповерхневих властивостей продуктів гідратації цементів на предмет взаємодії з волокнами; розробка схем електрогетерогенних контактів і структури композиційного матеріалу, які забезпечать потрібні фізико-механічні властивості дисперсно-армованого матеріалу; оптико-мікроскопічні, електронно-мікроскопічні дослідження, мікрорентгенівський аналіз дисперсно-армованого матеріалу на основі цементів; дослідження фізико-механічних властивостей традиційного прокладного шару; дослідження залежностей фізико-механічних властивостей композиційного матеріалу від його складу, розробка складу матеріалу, перевірка на морозостійкість; розроблення конструктивно-технологічних рішень улаштування та ремонту безбаластного мостового полотна із застосуванням дисперсно-армованого композиційного матеріалу, впровадження результатів досліджень.

В результаті досліджень отримано нові наукові результати, зокрема набули подальшого розвитку уявлення про вплив структури та характеру

взаємодії між продуктами гідратації і поверхнями волокон на фізико-механічні властивості дисперсно-армованого матеріалу на основі портландцементу, глиноземистого цементу, поліефірних волокон. Встановлені функціональні групи, які є активними центрами на поверхні поліефірних волокон і забезпечують їх електроповерхневі властивості, знаки та величини електроповерхневих потенціалів продуктів гідратації глиноземистого цементу. Вперше встановлено, що в дисперсно-армованому матеріалі на основі глиноземистого цементу та поліефірних волокон електрогетерогенні контакти з негативно зарядженими активними поверхневими центрами волокон утворюють кристали гідроалюмінату кальцію C_3AH_6 , з кристалами C_3AH_6 і поверхнями заповнювача – гелю гідроксиду алюмінію $Al(OH)_3$. Вперше встановлені залежності фізико-механічних властивостей дисперсно-армованого матеріалу на основі портландцементу, глиноземистого цементу, поліефірних волокон, від співвідношення вмісту заповнювача та цементу в мінеральній суміші, витрати мінеральної суміші на одиницю площі волокнистого матеріалу, ступеня ущільнення матеріалу.

Достовірність результатів досліджень забезпечена коректним застосуванням і метрологічним забезпеченням стандартних та оригінальних методів випробувань та досліджень, застосуванням незалежних методів досліджень, повторюваністю результатів випробувань, їх статистичною обробкою, узгодженістю результатів експериментальних і теоретичних досліджень. Практичне значення отриманих результатів полягає у забезпеченні збільшення міжремонтного періоду для безбаластного мостового полотна в середньому з 12,5 до 17,5 років, отже, на 40 %, підвищенням довговічності безбаластного мостового полотна з 12,5 до 30 років, отже, у 2,45 рази, проведенням ремонтних робіт без припинення руху поїздів замість ремонту у «вікна» тривалістю 6 годин, а також у наданні відповідних знань майбутнім фахівцям галузі шляхом впровадження в початковий процес.

За матеріалами дисертації опубліковано 24 наукові праці. Основні результати дисертаційного дослідження опубліковані у 8 наукових статтях, з яких 3 – у фахових виданнях України категорії Б, 5 – у виданнях, що індексуються НМБД Scopus, а також у 9 працях апробаційного характеру. Результати досліджень додатково відображені у 3 статтях, з яких в наукових журналах України – 2, іноземному журналі – 1, а також 2 описах до патентів на корисну модель і 2 описах до заявок на винаходи.

У **1 розділі** виконано аналіз конструкції, технології улаштування і особливостей експлуатації прокладного шару між безбаластним мостовим полотном із залізобетонних плит і подовжніми балками залізничних металевих мостів. Встановлено, що зручний для укладання і сприятливий за фізико-механічними характеристиками гумодерев'яний прокладний шар, який традиційно застосовується для сполучення плит БМП з металевими балками має недостатню довговічність через гниття деревини. В результаті аналізу напружено-деформованого стану залізобетонної плити безбаластного мостового полотна та з урахуванням технології укладання полотна встановлено, що міцність матеріалу прокладного шару між плитами і балками мосту через 6–8 годин після укладання має бути не меншою 1 МПа, у віці 2 доби та більше – не меншою 5 МПа, модуль деформації має бути не більшим ніж 10000 МПа. Цим умовам відповідають швидкотверднучі дисперсно-армовані композиції на основі мінеральних в'язучих речовини. Виконано аналіз мінеральних в'язучих і волокон для дисперсного армування на предмет створення композиційного матеріалу для прокладного шару, позбавленого недоліків гумодерев'яного поккладного шару. Показано, що для такого композиційного матеріалу придатними є портландцемент з добавками прискорювачами твердіння, глиноземистий цемент, нетканий матеріал об'ємної структури із поліефірних волокон. За результатами аналітичного огляду літературних джерел висунуто робочу гіпотезу: отримати прокладний шар між безбаластним мостовим полотном і балками мосту, який швидко набуває потрібні фізико-механічні властивості та має довговічність 30 років,

дозволить застосування для нього дисперсно-армованого композиційного матеріалу на основі цементу, фізико-механічні властивості якого забезпечуються електрогетерогенними контактами між поверхнями волокон і продуктів гідратації цементів.

У розділі 2 наведено матеріали і методи досліджень. Для розробки композиційного матеріалу для прокладного шару обрано як в'язучі речовини портландцемент ПЦ I або ПЦ II-A/B, швидкотверднучий глиноземистий цемент Isidas 40 виробництва Çimsa, Туреччина, а як дисперсне армування – нетканий матеріал об'ємної структури із анізотропно орієнтованих поліефірних волокон. Розроблено оригінальні методики дослідження: фізико-механічних властивостей композиційного матеріалу та композиції деревини та армованої гуми; залежності деформативних властивостей композиційного матеріалу від його складу і технології улаштування; гідрофізичних властивостей композиційного матеріалу; прискорення тужавлення цементів; фізико-хімічних досліджень композиційного матеріалу на основі цементів і поліефірного волокна. У складі фізико-хімічних досліджень незалежні методи – світлової мікроскопії, скануючої електронної мікроскопії, електронно-зондового мікроаналізу. Електронно-мікроскопічні дослідження морфології та локального елементного складу затверділого дисперсно-армованого композиційного матеріалу виконували на його відколах за допомогою скануючого електронного мікроскопу JEOL JSM-6390LV з енергодисперсійним спектрометром AZtechEnergy X-maxⁿ 50

Розділ 3 містить теоретичне обґрунтування забезпечення потрібних фізико-механічних властивостей дисперсно-армованого композиційного матеріалу. Виконано аналіз хімічного складу, структури, технології отримання поліефірних волокон. Встановлено, що волокна складаються із поліетилентерефталату, функціональними групами якого є неполярні ($-\text{COO}-$) та ароматичні кільця ($-\text{C}_6\text{H}_4-$). Проте ці групи у воді можуть гідролізуватись з утворенням гідроксильних груп $\text{OH}-$, а на кінцях полімерних ланцюгів можуть міститись гідроксильні групи $\text{OH}-$ та карбоксильні групи $-\text{COOH}$. На

поверхні поліефірних волокон містяться змащувачі – низькомолекулярні силікони, поліетиленгліколь, які також містять певну кількість груп OH^- . Отже, на поверхні поліефірних волокон, у т.ч. з покриттям із силіконів, поліетиленгліколю у водному середовищі тверднучих цементних паст утворюється певна кількість функціональних груп OH^- , COO^- , які є негативно зарядженими активними поверхневими центрами та здатні утворювати електрогетерогенні контакти з кристалогідратними продуктами гідратації цементів з позитивним поверхневим зарядом. Визначено електроповерхневі потенціали продуктів гідратації глиноземистого цементу. Встановлено, що рівноважний електроповерхневий потенціал кристалічного гідроалюмінату кальцію C_3AH_6 за $pH = 11,5$, характерного для рідкої фази тверднучого глиноземистого цементу, складає $+0,225$ В, гелю гідроксиду алюмінію $Al(OH)_3$ – мінус $0,354$ В. Отже, в середовищі порового електроліту тверднучого глиноземистого цементу вони мають, відповідно, позитивний та негативний поверхневі заряди і утворюють між собою електрогетерогенні контакти. Електрогетерогенні контакти з негативно зарядженими активними поверхневими центрами на поліефірному волокні утворюють кристали C_3AH_6 , з поверхнями заповнювача – гелю гідроксиду алюмінію $Al(OH)_3$. Виконано аналіз кристалічної будови C_3AH_6 і $Al(OH)_3$, встановлено, що потенціалвизначальними іонами їх поверхні є, відповідно, катіон кальцію Ca^{2+} і гідроксил-іон OH^- . Розроблено схеми електрогетерогенних контактів, які забезпечують фізико-механічні властивості дисперсно-армованих поліефірним волокном композитів: із портландцементу – між поверхнею волокна і кристалогідратами портландиту $Ca(OH)_2$, між кристалогідратами портландиту $Ca(OH)_2$ і частинками гідросилікатного гелю; із глиноземистого цементу – між поверхнею волокна і кристалогідратами C_3AH_6 , між кристалогідратами C_3AH_6 і гелем гідроксиду алюмінію $Al(OH)_3$. Розрахунками встановлено, що зусилля розриву елементарного електрогетерогенного контакту залежить від кількості шарів молекул H_2O в ньому. За відсутності H_2O зусилля розриву забезпечується безпосередньою

іон-іонною взаємодією між Ca^{2+} і OH^- і є максимальним, за одного ряду H_2O визначається іон-дипольною взаємодією між Ca^{2+} і H_2O і складає 0,31 від максимального, за двох та більше рядів H_2O визначається послідовною диполь-дипольною взаємодією між H_2O і складає не більше 0,12 від максимального.

У розділі 4 наведені результати експериментальних досліджень. Проведено оптико-мікроскопічні дослідження зрізів композиційного матеріалу із портландцементу, глиноземистого цементу і поліефірних волокон. Встановлено, що їх структура схожа, на зразках наявні ділянки добре ущільнені, на яких волокна у цементному камені майже не проглядаються, задовільно ущільнені, на яких проглядаються волокна, та незадовільно ущільнені з прошарками незаповненого цементним каменем волокнистого матеріалу. Наявність незадовільно ущільнених ділянок пов'язана з товщиною нетканого матеріалу об'ємної структури – у разі товщини 10 мм незадовільно ущільнені ділянки не спостерігались, максимальна кількість таких ділянок спостерігалась у зразках за його товщини 20 мм. Проведено електронно-мікроскопічні дослідження відколів композиційного матеріалу із портландцементу, глиноземистого цементу і поліефірних волокон. Встановлено, що їх мікроструктура схожа, у більшості волокон близько половини поверхні волокон вкрита продуктами гідратації. Волокна, майже вся поверхня яких щільно вкрита продуктами гідратації, зустрічаються лише у зразках на глиноземистому цементі, а волокна без продуктів гідратації та відбитки від волокон з гладкою поверхнею зустрічаються лише у зразках із портландцементу, що свідчить про краще зчеплення з поверхнею волокон продуктів гідратації глиноземистого цементу. В усіх зразках на поверхні волокон наявні кристали розміром декілька мкм, а також дрібніші гелеподібні утворення. У зразках із портландцементу наявні ізометричні кристали, а також окремі гексагональні пластини портландиту $Ca(OH)_2$, а серед гелеподібних утворень наявні волокнуваті кристали гідросилікатів кальцію розміром менше 1 мкм. У

зразках із глиноземистого цементу наявні ізометричні та кубічні кристали гідроалюмінатів кальцію C_3AH_6 , а також аморфна маса гідроксиду алюмінію $Al(OH)_3$. Безпосередньо на поверхні волокон спостерігаються переважно кристали. Проведено мікрорентгенівський аналіз відколів композиційного матеріалу із портландцементу, глиноземистого цементу і поліефірних волокон. Встановлено, що в матеріалі із портландцементу на поверхні відбитку від волокна на продуктах гідратації, відрив яких мав адгезійний характер, вміст CaO 82,8 % більший, а SiO_2 11,9 % менший порівняно з їх вмістом у середньому оксидному складі продуктів гідратації портландцементу 65,7 і 20,1 %, відповідно. Отже, на поверхні волокна зростають переважно кристали портландиту $Ca(OH)_2$. В матеріалі з глиноземистого цементу на поверхні волокон, відрив від яких продуктів гідратації мав когезійний характер, вміст CaO 39,2 % менший, а Al_2O_3 59,1 % – більший порівняно з їх вмістом у середньому оксидному складі продуктів гідратації 48 і 50,6 %, відповідно. Враховуючи результати електронної мікроскопії очевидно, що на поверхні волокон наявні кристали гідроалюмінату кальцію C_3AH_6 , вкриті гелем гідроксиду алюмінію $Al(OH)_3$.

Визначено величину модуля деформації і міцності на стиск композиції гуми і деревини для прокладного шару. Така композиція зазнає значних деформацій за рахунок гуми і раптово крихко руйнується. Модуль деформації складає 58,3 МПа для сосни і 144 МПа для дубу. Досліджено залежності модуля деформації та міцності на стиск дисперсно-армованого композиційного матеріалу від відношення кількості дрібного заповнювача до кількості цементу в мінеральній суміші, витрати мінеральної суміші на одиницю площі об'єму або площі нетканого матеріалу об'ємної структури, його товщини. Такий композиційний матеріал також зазнає значних деформацій, проте руйнування з порушенням структурної цілісності не спостерігається. Встановлено, що модуль деформації та умовна міцність на стиск композиційного матеріалу зменшуються зі збільшенням вмісту в мінеральній суміші дрібного заповнювача та зменшенням витрати

мінеральної суміші на одиницю площі та об'єму нетканого матеріалу. Композиційний матеріал має модуль деформації 144 МПа за відношення вмісту дрібного заповнювача від вмісту цементу не більше 0,11, витрати мінеральної суміші на нетканий матеріал не менше 1000 кг/м³ або 10 кг/м². Такі склади дисперсно-армованого композиційного матеріалу рекомендовано для улаштування прокладного шару.

Розділ 5 містить інформацію про впровадження результатів досліджень. Розроблено та запатентовано конструктивно-технологічне рішення прокладного шару із рулонного композиційного матеріалу, який складається із нетканого матеріалу об'ємної структури із поліефірних волокон, цементу, дрібного заповнювача і добавок-прискорювачів твердіння. Розроблено, запатентовано та впроваджено конструктивно-технологічне рішення ремонту, а також технологічний регламент ремонту безбаластного мостового полотна із залізобетонних плит з частковою заміною прокладного шару швидкотверднучим рулонним композиційним матеріалом. Соціально-економічна ефективність впровадження цього рішення забезпечена збільшенням міжремонтного періоду для безбаластного мостового полотна в середньому з 12,5 до 17,5 років, отже, на 40 %, підвищенням довговічності безбаластного мостового полотна з 12,5 до 30 років, отже, у 2,45 рази, проведенням ремонтних робіт без припинення руху поїздів замість ремонту у «вікна» тривалістю 6 годин. Результати дисертаційного дослідження впроваджено у навчальний процес з підготовки бакалаврів, магістрів, докторів філософії за спеціальностями 192 Будівництво та цивільна інженерія і 273 Залізничний транспорт.

У загальних висновках підсумовано виконання завдань досліджень і констатовано досягнення мети, а у додатках наведені додаткові матеріали.

Ключові слова: залізниця, міст, колія, залізобетонна плита, цемент, поліпропіленове волокно, рулонний композиційний матеріал, навантаження, міцність, деформація, відновлення, технологія.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати:

1. Плугін А.А., Муригіна Н.О., Малішевська А.С., Плугін Д.А., Муригін М.А. Розроблення та дослідження композиційного матеріалу для прокладного шару безбаластного мостового полотна *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту* 206 (2023) 82-101. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.206.2023.296619>
2. Лейбук Я.С., Скорик О.О., Муригіна Н.О., Зверєва А.С. Експериментальне визначення приведеної маси колії. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика* 15 (2019) 41-46. <https://doi.org/10.15802/bttrp2019/172384>
3. Вітольберг В.Г., Потапов Д.О., Малішевська А.С., Муригіна Н.О. Аналіз експлуатаційної стійкості рейок на лініях Харківського метрополітену *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту* 184 (2019) 102-107. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.184.2019.176427>
4. Plugin A.A., Zhu W., Murygin M.A., Plugin D.A., Murygina N.O. New research methods of electro-corrosion processes in concrete structures. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 1376 (2024) 012018. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1376/1/012018>
5. Plugin A., Murygina N., Miroshnichenko S., Kaliuzhna O. Materials for Connecting Railway Reinforced Concrete Bridge Deck with Steel Bridge Structures *Lecture Notes in Civil Engineering* 290 (2023) 318-328. https://doi.org/10.1007/978-3-031-14141-6_32
6. Shevchenko A.A., Shevchenko O.S., Lyuty V.A., Manuylenko V.G., Murygina N.A. Possible throughput of passenger trains on the accelerated lines of Ukraine *AIP Conference Proceedings* 268431 (2023) 0200119. <https://doi.org/10.1063/5.0121320>

7. Shevchenko A.A., Matviienko O.O., Lyuty V.A., Manuylenko V.G., Murygina N.A. Systems and subsystems of track, control and management of high-speed railway *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 1021 (2021) 012027 <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1021/1/012027>

8. Shevchenko A.A., Matviienko O.O., Lyuty V.A., Manuylenko V.G., Murygina N.A. Digital models and the effect of error when shooting terrain for high-speed traffic *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 708(119) (2019) 012028. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/708/1/012028>

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

1. Пługін А.А., Тулей Ю.Л., Муригіна Н.О., Пługін О.А., Муригін М.А., Мусієнко С.М. Новий композиційний матеріал для залізобетонного безбаластного мостового полотна залізничних мостів Тези доповідей 10 Міжнар. конфер. «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд і будівель на залізничному транспорті» (ТрансБуд-2024), УкрДУЗТ, Харків (20-22.11.2024) 52-55. <https://kart.edu.ua/wp-content/uploads/2024/09/tezi-transbud-2024-2.pdf>

2. Пługін А.А., Муригіна Н.О., Пługін Д.А., Муригін А.В., Малішевська А.С. Дисперсно армовані поліефірним волокном цементні композити для прокладного шару між залізобетонним мостовим полотном і металевими балками залізничних мостів. Збірник тез міжнар. наук.-техн. конфер. «Структурутворення та руйнування композиційних будівельних матеріалів та конструкцій», ОДАБА, Одеса (23.04.2024) 111-114. <https://drive.google.com/file/d/1jI7vWluCtPrF4HO4P4BpNs-at6XPvwR/view>

3. Пługін А.А., Zhu W., Муригін М.А., Пługін Д.А., Муригіна Н.О. Нові методи досліджень електрокорозійних процесів у конструкціях із бетону. II Всеукр. наук.-практ. конфер. «BIM-технології в будівництві: Досвід та інновації». ХНУМГ, Харків (15-16.12.2023) 94-95. https://dmg.kname.edu.ua/images/other/Tezi_BIM_2023.pdf

4. Пługін А.А., Муригіна Н.О., Малішевська А.С., Муригін М.А., Манько Н.С. Матеріали для сполучення залізничного залізобетонного

мостового полотна зі сталевими мостовими конструкціями. Матер. 82 Міжнар. наук.-практ. конфер. «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту», за ред. Ю.С.Пройдака, Р.В.Маркуля. УкрДУНТ, Дніпро (20-21.04 2023) 364-366.

<http://eadnurt.diit.edu.ua/jspui/handle/123456789/16951>

5. Плуґін А.А., Муригіна Н.О., Мірошніченко С.В. Порівняльний аналіз матеріалів для прокладного шару залізничного безбаластного мостового полотна. Міжнар. наук.-техн. конфер. «Органічні і мінеральні в'язучі та дорожні бетони на їх основі». ХНАДУ. Харків (08-09.11.2022) 118-121.

https://rcf.khadi.kharkov.ua/fileadmin/user_upload/Збірник_тез_-_Редакція_.pdf

6. Шевченко А.О., Матвієнко О.О., Лютий В.А., Мануйленко В.Г., Муригіна Н.О. Енергоменеджмент по впровадженню системи високошвидкісної залізниці Тези доповідей міжнар. наук.-техн. конфер. «Енергоефективність на транспорті». УкрДУЗТ, Харків (18-20.11.2020) 116-118.

http://eet-conf.kart.edu.ua/images/stories/konf-1/pdf/Theses_EET_2020_27.01.pdf

7. Шевченко А.О., Шевченко О.С., Лютий В.А., Мануйленко В.Г., Муригіна Н.О. Технічні вимоги експлуатації високошвидкісної залізниці України. Тези доповідей 9 Міжнар. конфер. «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд і будівель на залізничному транспорті» (ТрансБуд-2021), УкрДУЗТ, Харків (17-19.11.2021) 67-68.

<http://lib.kart.edu.ua/handle/123456789/11096>

8. Shevchenko A., Bugaev N., Murygina N., Korostelov Ye., Viselga G. Analysis of existing passenger traffic by mode of transport and assessment the competitiveness high-speed traffic in Ukraine. The 11th International Conference “Environmental Engineering” conference (11th ICEE) Vilnius, Lithuania (21-22.05.2020) <https://doi.org/10.3846/enviro.2020.689>

9. Bugaev N.V. Shevchenko A. A. Murygina N.A. Shevchenko O.S Development of a mathematical model of joint work of the way and rolling stock in the zone of rail joints. Proceedings of the XX International Scientific and Practical Conference International Trends in Science and Technology Vol.1,

December 28, 2019, Warsaw, Poland. (ISBN 978-83-955313-8-5). P. 30-38.
<https://conferences.rsglobal.pl/index.php/conf/catalog/view/16/23/382-1>

Публікації, що додатково відображають матеріали дисертації:

1. Шевченко А., Муригіна Н. Моделювання роботи дисперсно-армованого матеріалу для прокладного шару безбаластного мостового полотна *Наука і техніка сьогодні* 4(4) (2022) [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2022-4\(4\)-175-182](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2022-4(4)-175-182)

2. Шевченко А., Муригіна Н. Сучасні засоби та проблематика впровадження систем оцінювання стану мостів України *Наука і техніка сьогодні* 8(8) (2022) [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2022-8\(8\)-175-182](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2022-8(8)-175-182)

3. Штомпель А.М., Малішевська А.С., Муригіна Н.О. Нормативна база для призначення ремонтів колії на залізницях України. *Almanahul SWorld* 2 (2019) 25-30. <http://repository.vsau.org/getfile.php/21905.pdf>

4. Пат. на кор. модель 155132 UA МПК E04B 5/10 (2006.01) Спосіб ремонту безбаластного мостового полотна залізничних мостів із залізобетонних плит. УкрДУЗТ. А.А.Плугін, Н.О.Муригіна, А.В.Муригін, С.В.Панченко, Д.А.Плугін, W.Zhu, О.А.Плугін, О.А.Дудін, М.А.Муригін, С.М.Мусієнко. Заявл. 28.08.2023, заявка № u 2023 04061, опубл.17.01.2024, бюл.№3/2024.
https://sis.nipo.gov.ua/media/UTILITY_MOD/2023/u202304061/published_description.pdf

5. Пат. на кор. модель 153601 UA Спосіб улаштування прокладного шару між сталевими балками залізничного мосту і залізобетонними плитами безбаластного мостового полотна МПК E04B 5/10 (2006.01). УкрДУЗТ. А.А.Плугін, Н.О.Муригіна, С.В.Мірошніченко, Т.О.Костюк, С.В.Панченко, Г.Л.Ватуля, Д.О.Плугін, О.А.Калінін, О.А.Плугін, О.В.Лобяк, А.В.Муригін, О.А.Дудін. Заявл.19.12.2022, Заявка №u 2022 04806. Пріоритет 27.07.2023. Опубл.26.07.2023, Бюл. №30. <http://lib.kart.edu.ua/handle/123456789/18014>

6. Спосіб улаштування прокладного шару між сталевими балками залізничного мосту і залізобетонними плитами безбаластного мостового

полотна. УкрДУЗТ. А.А. Пługін, Н.О. Муригіна, С.В. Мірошніченко, Т.О. Костюк, С.В. Панченко, Г.Л. Ватуля, Д.О. Пługін, О.А. Калінін, О.А. Пługін, О.В. Лобяк, А.В. Муригін, О.А. Дудін. Заявка на видачу патенту на винахід №а 2022 04805. Заявл. 19.12.2022.
<http://lib.kart.edu.ua/handle/123456789/18014>

7. Спосіб ремонту безбаластного мостового полотна залізничних мостів із залізобетонних плит. УкрДУЗТ. А.А. Пługін, Н.О. Муригіна, А.В. Муригін, С.В. Панченко, Д.А. Пługін, W. Zhu, О.А. Пługін, О.А. Дудін, М.А. Муригін, С.М. Мусієнко. Заявка на видачу патенту на винахід №а 2023 04060. Заявл. 28.08.2023.
https://sis.nipo.gov.ua/media/UTILITY_MOD/2023/u202304061/published_description.pdf

ABSTRACT

Murygina N.O. Disperse-reinforced material for the laying layer of the railway ballastless bridge deck. Qualifying scientific work on manuscript rights.

Dissertation of Doctor of Philosophy degree in Specialty – 192 Construction and Civil Engineering. Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, 2025.

The dissertation was completed at the Department of Railway Track and Transport Structures of the Ukrainian State University of Railway Transport and consists of an introduction, five sections, general conclusions, a list of 107 sources, and annexes.

A general description of the work was presented at the introduction, in particular, the relevance of the chosen topic was proved, the connection with scientific programs and plans was shown, the purpose, object and subject, research objectives was formulated, sets out the provisions of scientific novelty, substantiates the reliability and practical significance of the results, data on their approbation was given. The **introduction** provides a general overview of the work,

including the justification of the chosen topic's relevance, its connection to scientific programs and plans, the formulation of the research objective, object, and subject, as well as the research tasks. It also presents the scientific novelty, substantiates the reliability and practical significance of the obtained results, and provides data on their validation. Most metallic bridges feature a ballastless bridge deck on reinforced concrete slabs, which are placed on the metal beams of the span structures. The connecting element between the slabs of the ballastless bridge deck (BBD) and the beams is a rubber-wood interlayer. Its advantages include simplicity and ease of installation. However, it has low durability, and due to biological degradation of the wood, leading to the loss of its physical and mechanical properties, it can cause rapid track failures. For this reason, the development of a new durable, fast-curing composite material and a structural-technological solution for the interlayer beneath the BBD is a relevant task. The relevance of this research is further emphasized by its inclusion in state-funded scientific research projects under the Ministry of Education and Science of Ukraine.

The aim of the research is to develop a dispersed-reinforced composite material based on cement and polyester fibers, suitable in terms of physical and mechanical properties for the interlayer of railway ballastless bridge decks. The **subject of the research** is the dispersed-reinforced composite material based on cement and polyester fibers for the interlayer of railway ballastless bridge decks. The object of the research is the physical and mechanical properties, including deformative characteristics, of the dispersed-reinforced composite material based on cement and polyester fibers, as well as the process of their formation.

The research tasks include:

Analysis of the structure, installation technology, and operational features of the interlayer between the ballastless bridge deck made of reinforced concrete slabs and the longitudinal beams of railway metal bridges.

Analytical review of binders and fibers suitable for creating a dispersed-reinforced composite material based on cement for the interlayer.

Analysis of the chemical composition, structure, production technology, and electro-surface properties of fibers for dispersed reinforcement concerning their interaction with cement hydration products.

Analysis of the electro-surface properties of cement hydration products concerning their interaction with fibers.

Development of electro-heterogeneous contact schemes and the structure of the composite material to ensure the required physical and mechanical properties of the dispersed-reinforced material.

Optical-microscopic, electron-microscopic studies, and micro X-ray analysis of the dispersed-reinforced material based on cement.

Investigation of the physical and mechanical properties of the traditional interlayer material.

Study of the dependencies of the composite material's physical and mechanical properties on its composition, development of the material composition, and frost resistance testing.

Development of structural and technological solutions for the installation and repair of ballastless bridge decks using dispersed-reinforced composite material.

Implementation of the research results.

As a result of the research, new scientific findings have been obtained. In particular, the understanding of the influence of structure and the nature of interaction between hydration products and fiber surfaces on the physical and mechanical properties of dispersed-reinforced material based on Portland cement, high-alumina cement, and polyester fibers has been further developed.

The functional groups that serve as active centers on the surface of polyester fibers and determine their electro-surface properties, as well as the signs and magnitudes of the electro-surface potentials of high-alumina cement hydration products, have been identified.

For the first time, it has been established that in dispersed-reinforced material based on high-alumina cement and polyester fibers, electro-heterogeneous

contacts with negatively charged active surface centers of the fibers form calcium hydroaluminate (C_3AH_6) crystals. Additionally, hydroaluminum gel ($Al(OH)_3$) forms between C_3AH_6 crystals and the surfaces of aggregates.

For the first time, dependencies of the physical and mechanical properties of dispersed-reinforced material based on Portland cement, high-alumina cement, and polyester fibers have been determined concerning the ratio of aggregate to cement in the mineral mixture, the consumption of the mineral mixture per unit area of fiber material, and the degree of material compaction.

The reliability of the research results is ensured by the correct application and metrological support of both standard and original testing and research methods, the use of independent research methods, the repeatability of test results, their statistical processing, and the consistency of experimental and theoretical research findings.

The practical significance of the obtained results includes increasing the maintenance interval for ballastless bridge decks from an average of 12.5 to 17.5 years (a 40% improvement), extending the durability of ballastless bridge decks from 12.5 to 30 years (an increase by a factor of 2.45), enabling repair work without interrupting train traffic instead of requiring six-hour maintenance windows, and providing relevant knowledge to future industry professionals through implementation in the educational process.

24 scientific papers have been published based on the materials of the dissertation. The main results of the dissertation research have been published in eight scientific articles, of which three are in specialized Ukrainian journals of Category B, five are in publications indexed by Scopus, as well as in nine works of an approbatory nature. The research results are additionally reflected in three articles, of which two are in scientific journals of Ukraine, one in a foreign journal, as well as two descriptions of patents for utility models and two descriptions of applications for inventions.

Chapter 1 analyzes the design, installation technology, and operational characteristics of the bedding layer between the ballastless bridge deck made of

reinforced concrete slabs and the longitudinal beams of railway metal bridges. It has been established that the traditional rubber-wood bedding layer, which is convenient for installation and favorable in terms of physical and mechanical characteristics, has insufficient durability due to wood decay.

As a result of analyzing the stress-strain state of the reinforced concrete slab in the ballastless bridge deck and considering the installation technology, it has been determined that the strength of the bedding layer material between the slabs and bridge beams should be at least 1 MPa within 6–8 hours after installation and at least 5 MPa after two days or more. Additionally, the deformation modulus should not exceed 10,000 MPa. These conditions can be met by using rapid-hardening dispersed-reinforced compositions based on mineral binders.

A study of mineral binders and fibers suitable for dispersed reinforcement has been conducted to develop a composite material for the bedding layer that eliminates the drawbacks of the rubber-wood bedding layer. It has been demonstrated that suitable materials for such a composite include Portland cement with hardening accelerators, high-alumina cement, and a nonwoven volumetric material made of polyester fibers.

Based on a literature review, a working hypothesis has been proposed: a bedding layer between the ballastless bridge deck and bridge beams that rapidly attains the required physical and mechanical properties and has a service life of 30 years can be achieved using a dispersed-reinforced composite material based on cement, whose physical and mechanical properties are ensured by electro-heterogeneous contacts between fiber surfaces and cement hydration products.

Chapter 2 presents the materials and research methods. For the development of a composite material for the cushioning layer, the selected binding agents include Portland cement PC I or PC II-A/B, rapid-hardening alumina cement Isidac 40 produced by Çimsa, Turkey. As the dispersed reinforcement, a nonwoven volumetric material with anisotropically oriented polyester fibers was used. Original research methodologies were developed, including the study of the physico-mechanical properties of the composite material and the composition of

wood and reinforced rubber; the dependence of the deformative properties of the composite material on its composition and installation technology; the hydro-physical properties of the composite material; the acceleration of cement setting; and physico-chemical studies of the composite material based on cements and polyester fiber. The physico-chemical studies involved independent methods such as light microscopy, scanning electron microscopy, and electron probe microanalysis. Electron-microscopic studies of the morphology and local elemental composition of the hardened dispersed-reinforced composite material were carried out on its fractures using a JEOL JSM-6390LV scanning electron microscope equipped with an AZtechEnergy X-maxn 50 energy-dispersive spectrometer.

Chapter 3 provides the theoretical justification for ensuring the required physico-mechanical properties of the dispersed-reinforced composite material. An analysis was conducted on the chemical composition, structure, and production technology of polyester fibers. It was established that the fibers consist of polyethylene terephthalate, whose functional groups include non-polar ($-\text{COO}-$) and aromatic rings ($-\text{C}_6\text{H}_4-$). However, these groups can hydrolyze in water, forming hydroxyl ($\text{OH}-$) groups, and the polymer chain ends may contain hydroxyl ($\text{OH}-$) and carboxyl ($-\text{COOH}$) groups.

The surface of polyester fibers contains lubricants—low-molecular-weight silicones and polyethylene glycol which also include a certain amount of $\text{OH}-$ groups. Therefore, on the surface of polyester fibers, including those coated with silicones and polyethylene glycol, in the aqueous medium of hardening cement pastes, a certain number of functional groups $\text{OH}-$, $\text{COO}-$ are formed. These groups act as negatively charged active surface centers and can create electroheterogeneous contacts with the crystallohydrate products of cement hydration, which have a positive surface charge.

The electro-surface potentials of the hydration products of alumina cement were determined. It was established that the equilibrium electro-surface potential of crystalline calcium hydroaluminate (C_3AH_6) at $\text{pH} = 11.5$, typical for the liquid phase of hardening alumina cement, is $+0.225$ V, while that of aluminum

hydroxide gel ($\text{Al}(\text{OH})_3$) is -0.354 V. Thus, in the pore electrolyte environment of hardening alumina cement, they have positive and negative surface charges, respectively, forming electroheterogeneous contacts with each other.

Crystals of C_3AH_6 form electroheterogeneous contacts with the negatively charged active surface centers on the polyester fiber, while the aluminum hydroxide gel ($\text{Al}(\text{OH})_3$) forms contacts with the filler surfaces. An analysis of the crystalline structure of C_3AH_6 and $\text{Al}(\text{OH})_3$ revealed that their surface potential-determining ions are calcium cations (Ca^{2+}) and hydroxyl anions (OH^-), respectively.

Schemes of electroheterogeneous contacts were developed, ensuring the physico-mechanical properties of polyester fiber-reinforced composites:

In Portland cement-based composites: between the fiber surface and the crystallohydrates of portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), as well as between the crystallohydrates of portlandite and hydro-silicate gel particles.

In alumina cement-based composites: between the fiber surface and the crystallohydrates of C_3AH_6 , as well as between the crystallohydrates of C_3AH_6 and aluminum hydroxide gel ($\text{Al}(\text{OH})_3$).

Calculations established that the breaking force of an elementary electroheterogeneous contact depends on the number of layers of H_2O molecules within it. In the absence of H_2O , the breaking force is provided by direct ion-ion interaction between Ca^{2+} and OH^- and is at its maximum. With one layer of H_2O , the force is determined by ion-dipole interaction between Ca^{2+} and H_2O and constitutes 0.31 of the maximum value. With two or more layers of H_2O , the force is determined by sequential dipole-dipole interactions between H_2O molecules and does not exceed 0.12 of the maximum value.

Chapter 4 presents the results of experimental studies. Optical microscopy was conducted on cross-sections of composite material based on Portland cement, alumina cement, and polyester fibers. It was established that their structure is similar, with areas classified as well-compacted (where fibers are barely visible in the cement matrix), satisfactorily compacted (where fibers are visible), and poorly

compacted (where fiber material is not fully embedded in the cement matrix). The presence of poorly compacted areas is associated with the thickness of the nonwoven volumetric material. When the thickness was 10 mm, no poorly compacted areas were observed, whereas the highest number of such areas was found in samples with a thickness of 20 mm.

Electron microscopy was performed on fractured composite material containing Portland cement, alumina cement, and polyester fibers. It was found that their microstructure is similar: in most fibers, about half of the surface is covered with hydration products. Fibers with an almost entirely dense coverage of hydration products were found only in samples with alumina cement. Conversely, fibers without hydration products and imprints of smooth-surfaced fibers were observed only in samples with Portland cement, indicating better adhesion of hydration products to fiber surfaces in alumina cement composites.

In all samples, fiber surfaces contained crystals several micrometers in size, along with smaller gel-like formations. In Portland cement-based samples, isometric crystals and individual hexagonal portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) plates were present, while among the gel-like formations, fibrous calcium hydrosilicate crystals smaller than 1 μm were observed. In alumina cement-based samples, isometric and cubic crystals of calcium hydroaluminates (C_3AH_6) were detected, along with an amorphous mass of aluminum hydroxide ($\text{Al}(\text{OH})_3$). Crystals were predominantly found directly on the fiber surfaces.

A micro X-ray analysis of fractured composite material samples with Portland cement, alumina cement, and polyester fibers was also conducted.

It was established that in the Portland cement-based material, on the imprint surface left by the fiber on the hydration products, where detachment occurred in an adhesive manner, the CaO content was 82.8%, which is higher, and the SiO_2 content was 11.9%, which is lower, compared to their average oxide composition in Portland cement hydration products (65.7% and 20.1%, respectively). This indicates that portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) crystals predominantly grow on the fiber surface. In the alumina cement-based material, on the fiber surfaces where

hydration product detachment was cohesive in nature, the CaO content was 39.2% lower, while the Al_2O_3 content was 59.1% higher compared to their average oxide composition in the hydration products (48% and 50.6%, respectively). Considering the results of electron microscopy, it is evident that calcium hydroaluminate (C_3AH_6) crystals are present on the fiber surface, covered with an aluminum hydroxide ($\text{Al}(\text{OH})_3$) gel.

The modulus of deformation and compressive strength of the rubber-wood composite material for the cushioning layer were determined. This composite undergoes significant deformation due to rubber and fails suddenly in a brittle manner. The modulus of deformation was found to be 58.3 MPa for pine and 144 MPa for oak.

The dependence of the modulus of deformation and compressive strength of the dispersion-reinforced composite material on the ratio of fine aggregate to cement in the mineral mixture, the consumption of the mineral mixture per unit area or volume of the nonwoven bulk-structured material, and its thickness was investigated. This composite material also undergoes significant deformations; however, structural integrity failure is not observed.

It was established that the modulus of deformation and conditional compressive strength of the composite material decrease with an increase in the fine aggregate content in the mineral mixture and a decrease in the consumption of the mineral mixture per unit area and volume of the nonwoven material. The composite material achieves a modulus of deformation of 144 MPa when the fine aggregate-to-cement ratio does not exceed 0.11, and the consumption of the mineral mixture on the nonwoven material is at least 1000 kg/m^3 or 10 kg/m^2 . These compositions of dispersion-reinforced composite material are recommended for use in cushioning layers.

Chapter 5 contains information about the implementation of the research results. A structural and technological solution for a cushioning layer made from roll-based composite material, consisting of nonwoven material with a three-dimensional structure of polyester fibers, cement, fine aggregate, and hardening

accelerators, has been developed and patented. A structural and technological solution for the repair of ballastless bridge decks made of reinforced concrete slabs, with partial replacement of the cushioning layer by fast-setting roll composite material, has been developed, patented, and implemented. The socio-economic effectiveness of implementing this solution is ensured by an increase in the inter-repair period for ballastless bridge decks, on average, from 12.5 to 17.5 years (a 40% increase), as well as an increase in the durability of the ballastless bridge deck from 12.5 to 30 years (a 2.45-fold increase). Additionally, repair work can now be carried out without interrupting train traffic, unlike repairs conducted during a "window" period of 6 hours. The results of the dissertation research have been incorporated into the educational process for training bachelor's, master's, and Ph.D. students in the fields of 192 Construction and Civil Engineering, and 273 Railway Transport.

The general conclusions that summarized the performance of the research tasks and state the achievement of the goal and additional materials are given in the annexes.

Keywords: railway, bridge, track, reinforced concrete slab, cement, polypropylene fiber, rolled composite material, load, strength, deformation, recovery, technology.

LIST OF PUBLIKATIONS OF THE ACQUIRER

Scientific works in which the main scientific results were published:

1. Plugin A.A., Murygina N.O., Malishevskaya A.S., Plugin D.A., Murygin M.A. Development and analysis of composite material for the ballastless bridge deck. Collection of scientific works of Ukrainian State University of Railway Transport. 206 (2023) 82-101. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.206.2023.296619>
2. Leibuk Y.S., Scoryk A.A., Murygina N.O., Zvierieva A.S., Experimental determination of the reduced mass of a track. Bridges and Tunnels: Theory, Research, Practice, 15 (2019) 41-46. <https://doi.org/10.15802/bttrp2019/172384>
3. Vitolberh V.H., Potapov D.O., Malishevskaya A.S., Murygina N.O. Analysis of the operational stability of rails on the lines of the Kharkiv Metro. Collection of Scientific Papers of the Ukrainian State University of Railway Transport. 184 (2019) 102-107. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.184.2019.176427>
4. Plugin A.A., Zhu W., Murygin M.A., Plugin D.A., Murygina N.O. New research methods of electro-corrosion processes in concrete structures. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, (https://iopscience.iop.org/journal/1755-1315) 1376 (2024) 012018. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1376/1/012018>
5. Plugin A., Murygina N., Miroshnichenko S., Kaliuzhna O. Materials for Connecting Railway Reinforced Concrete Bridge Deck with Steel Bridge Structures. In: Blikharsky, Z. (eds) Proceedings of EcoComfort 2022. Lecture Notes in Civil Engineering, Springer, 290 (2023) 318-328. https://doi.org/10.1007/978-3-031-14141-6_32
6. Shevchenko A.A., Shevchenko O.S., Lyuty V.A., Manuylenko V.G., Murygina N.A. Possible throughput of passenger trains on the accelerated lines of Ukraine AIP Conference Proceedings 268431 (2023) 0200119. <https://doi.org/10.1063/5.0121320>

7. Shevchenko A.A., Matviienko O.O., Lyuty V.A., Manuylenko V.G., Murygina N.A. Systems and subsystems of track, control and management of high-speed railway IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 1021 (2021) 012027 <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1021/1/012027>

8. Shevchenko A.A., Matviienko O.O., Lyuty V.A., Manuylenko V.G., Murygina N.A. Digital models and the effect of error when shooting terrain for high-speed traffic IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 708(119) (2019) 012028. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/708/1/012028>

Scientific works that confirm the approval of the dissertation materials:

1. Plugin A.A., Tulei Y.L., Murygina N.O., Plugin A.A., Murygin M.A., Musiienko S.M. New composite material for reinforced concrete ballastless bridge decks of railway bridges. Abstracts of reports of the 10th International Conference "Problems of reliability and durability of engineering structures and buildings on railway transport" (TransBud-2024), Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv (20-22.11.2024) 52-55. <https://kart.edu.ua/wp-content/uploads/2024/09/tezi-transbud-2024-2.pdf>

2. Plugin A.A., Murygina N.O., Plugin D.A., Malishevska A.S. , Murygin M.A. Disperse-reinforced polyester fiber cement composites for the underlayment between reinforced concrete bridge deck and metal girders of railway bridges. Collection of abstracts of the international scientific and technical conference "Structure formation and failure of composite building materials and structures" Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Odesa 23.04.2024. C.111-114. <https://drive.google.com/file/d/1jI7vWluCtPrF4HO4P4BpNs-at6XPvwR/view>

3. Plugin A.A., Zhu W., Murygin M.A., Plugin D.A., Murygina N.O. New methods of research of electrocorrosion processes in concrete structures. II All-Ukrainian scientific-practical conference "BIM technologies in construction: Experience and innovations". Kharkiv 15-16.12.2023, XHYMF (2023) 94-95. https://dmg.kname.edu.ua/images/other/Tezi_BIM_2023.pdf

4. Plugin A.A., Murygina N.O., Malishevskaya A.S., Murygin M.A. Manko N.S. Materials for connecting railway reinforced concrete bridge decks with steel bridge structures. Mater. 82nd International Scientific-Practical Conference "Problems and Prospects for the Development of Railway Transport", April 20-21, 2023. Proidak Y.S., Markul R.V. Ukrainian State University of Railway Transport, Dnipro (2023) 364-366. <http://eadnurt.diit.edu.ua/jspui/handle/123456789/16951>

5. Plugin A.A., Murygina N.O., Miroshnichenko S.V. Comparative analysis of materials for the bearing layer of a ballastless railway bridge deck. International scientific and technical conference "Organic and mineral binders and road concretes based on them". Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv 08-09.11.2022. C.118-121. https://ref.khadi.kharkov.ua/fileadmin/user_upload/Збірник_тез_-_Редакція_.pdf

6. Shevchenko A.O., Matvienko O.O., Lyuty V.A., Manuylenko V.G., Murygina N.O. Energy management for the implementation of the high-speed railway system Abstracts of the reports of the international scientific and technical conference "Energy efficiency in transport". Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv (18-20.11.2020) 116-118. http://eet-conf.kart.edu.ua/images/stories/konf-1/pdf/Theses_EET_2020_27.01.pdf

7. Shevchenko A.O., Shevchenko O.S., Lyuty V.A., Manuylenko V.G., Murygina N.O. Technical requirements for the operation of high-speed railways in Ukraine. Abstracts of reports of the 9th International Conference "Problems of reliability and durability of engineering structures and buildings in railway transport" (TransBud-2021), Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv (17-19.11.2021) 67-68. <http://lib.kart.edu.ua/handle/123456789/11096>

8. Shevchenko A., Bugaev N., Murygina N., Korostelov Ye., Viselga G. Analysis of existing passenger traffic by mode of transport and assessment the competitiveness high-speed traffic in Ukraine. The 11th International Conference "Environmental Engineering" conference (11th ICEE) Vilnius, Lithuania (21-22.05.2020) <https://doi.org/10.3846/enviro.2020.689>

9. Bugaec N.V. Shevchenko A. A. Murygina N.A. Shevchenko O.S Development of a mathematical model of joint work of the way and rolling stock in the zone of rail joints. Proceedings of the XX International Scientific and Practical Conference International Trends in Science and Technology Vol.1, December 28, 2019, Warsaw, Poland. (ISBN 978-83-955313-8-5). P. 30-38.
<https://conferences.rsglobal.pl/index.php/conf/catalog/view/16/23/382-1>

Publications that additionally reflect the materials of the dissertation:

1. Shevchenko A., Murygina N. Modeling the performance of dispersed-reinforced material for the bearing layer of a ballastless bridge deck Science and Technology Today 4(4) (2022) [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2022-4\(4\)-175-182](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2022-4(4)-175-182)

2. Shevchenko A., Murygina N. Modern tools and issues of implementing systems for assessing the condition of bridges in Ukraine Science and Technology Today 8(8) (2022) [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2022-8\(8\)-175-182](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2022-8(8)-175-182)

3. Shtompel A.M., Malyshevska A.S., Murygina N.O. Regulatory framework for the appointment of track repairs on the railways of Ukraine. Almanahul SWorld, 2 (2019) 25-30.
<http://repository.vsau.org/getfile.php/21905.pdf>

4. Utility model patent 155132 UA MPK E04V 5/10 (2006.01) Method of repairing ballastless bridge decks of railway bridges made of reinforced concrete slabs.Ukrainian State University of Railway Transport. A.A.Plugin, N.O.Murygina, A.V.Murygin, S.V.Panchenko, D.A.Plugin, W.Zhu, O.A.Plugin, O.A.Dudin, M.A.Murygin, S.M.Musienko. Application. 28.08.2023, application № u 2023 04061, publ.17.01.2024, bull. №3/2024.
https://sis.nipo.gov.ua/media/UTILITY_MOD/2023/u202304061/published_description.pdf

5. Method of arranging a cushion layer between steel beams of a railway bridge and reinforced concrete slabs of a ballastless bridge deck MPK E04B 5/10 (2006.01). Ukrainian State University of Railway Transport. A.A.Plugin, N.O.Murygina, S.V.Miroshnichenko, T.O.Kostyuk, S.V.Panchenko, G.L.Vatulya,

D.O.Plugin, O.A.Kalinin, O.A.Plugin, O.V.Lobyak, A.V.Murygin, O.A.Dudin. Application 19.12.2022, Application No. 2022 04806. Priority 27.07.2023. Publ. 26.07.2023, Bull. No. 30. <http://lib.kart.edu.ua/handle/123456789/18014>

6. Method of arranging a cushion layer between steel beams of a railway bridge and reinforced concrete slabs of a ballastless bridge deck. Ukrainian State University of Railway Transport. Plugin A.A, Murygina N.O, Miroshnichenko S.V, Kostyuk T.O, Panchenko S.V, Vatulya G.L, .Plugin D.O, Kalinin O.A, Plugin O.A, Lobyak O.V, Murygin A.V, Dudin O.A. Application for a patent for an invention No. a 2022 04805. Application. 19.12.2022. <http://lib.kart.edu.ua/handle/123456789/18014>

7. Method for repairing ballastless bridge decks of railway bridges made of reinforced concrete slabs.Ukrainian State University of Railway Transport.Plugin A.A,Murygina N.O,Murygin A.V, Panchenko S.V,Plugin D.A, W.Zhy, Plugin O.A, Dudin O.A, Murygin M.A, Musienko S.M. Application for a patent for an invention No. a 2023 04060. Application. 28.08.2023. https://sis.nipo.gov.ua/media/UTILITY_MOD/2023/u202304061/published_description.pdf

ЗМІСТ

ВСТУП	33
РОЗДІЛ 1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ І НОРМАТИВНИХ ДЖЕРЕЛ З ПИТАНЬ УЛАШТУВАННЯ ТА УТРИМАННЯ ЗАЛІЗОБЕТОННОГО БЕЗБАЛАСТНОГО МОСТОВОГО ПОЛОТНА ЗАЛІЗНИЧНИХ МОСТІВ ТА ПРОКЛАДНОГО ШАРУ ПІД НИМ	41
1.1 Конструкція, особливості технології улаштування та проблеми експлуатації залізобетонного безбаластного мостового полотна та прокладного шару під ним	41
1.2 Альтернативні конструктивно-технологічні рішення прокладного шару під залізобетонного безбаластного мостового полотна та матеріали для них	44
1.3 Потрібні фізико-механічні властивості прокладного шару	47
1.4 Аналітичний огляд в'язучих речовин і композиційних матеріалів, придатних для улаштування прокладного шару під безбаластним мостовим полотном	51
1.4.1 Прискорення твердіння портландцементу	51
1.4.2 Кальцієво-алюмінатні цементи	53
1.4.3 Дисперсне армування	58
1.5 Робоча гіпотеза досліджень	63
Висновки до розділу 1	64
РОЗДІЛ 2 ВИБІР МАТЕРІАЛІВ ТА РОЗРОБКА МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕНЬ	65
2.1 Вибір швидкотверднучого цементу для створення композиту	65
2.2 Вибір полімерного волокнистого матеріалу для армування композиту	68
2.3 Матеріали для експериментальних досліджень	69
2.4 Оригінальна методика дослідження залежності деформативних властивостей композиту від його складу і технології улаштування	71

2.5 Дослідження фізико-механічних властивостей композиції деревини та армованої гуми	78
2.6 Дослідження гідрофізичних властивостей композиційного матеріалу	80
2.7 Дослідження прискорення тужавлення цементів	81
2.8 Фізико-хімічні дослідження композиційного матеріалу на основі цементів і поліефірного волокна	82
Висновки до розділу 2	85
РОЗДІЛ 3 ТЕОРЕТИЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ СКЛАДУ КОМПОЗИЦІЙНОГО МАТЕРІАЛУ ІЗ ЦЕМЕНТУ ТА ПОЛІЕФІРНОГО ВОЛОКНА ДЛЯ ПРОКЛАДНОГО ШАРУ	86
3.1 Аналіз здатності волокна до взаємодії з продуктами гідратації цементів	86
3.2 Аналіз електроповерхневих властивостей продуктів гідратації портландцементу та глиноземистого цементу	89
3.3 Взаємодія продуктів гідратації портландцементу, глиноземистого цементу та поліефірного волокна	96
Висновки до розділу 3	109
РОЗДІЛ 4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТЕЙ ВЛАСТИВОСТЕЙ КОМПОЗИЦІЙНОГО МАТЕРІАЛУ ІЗ ЦЕМЕНТУ ТА ПОЛІЕФІРНОГО ВОЛОКНА ВІД ЇЇ СКЛАДУ	111
4.1 Результати фізико-хімічних досліджень взаємодії продуктів гідратації цементу і поліефірних волокон	111
4.1.1 Мікроскопічні дослідження композиційного матеріалу із цементу і поліефірних волокон	111
4.1.2 Електронно-мікроскопічні дослідження композиційного матеріалу із цементу і поліефірних волокон	113
4.1.3 Рентгенівський мікроаналіз продуктів гідратації в контактній зоні з поверхнею поліефірних волокон	118
4.2 Експериментальні дослідження композитів для прокладного шару....	130
4.2.1 Фізико-механічні властивості композиції деревини та армованої	

гуми	130
4.2.2 Фізико-механічні властивості композиційних матеріалів на основі цементів і НМОС	131
4.2.3 Залежність модуля деформації композиту від співвідношення органічної та мінеральної складових в ньому	132
4.2.4 Гідрофізичні властивості композиційних матеріалів на основі цементів і НМОС	138
4.3 Строки тужавлення цементів і вплив добавок на них	138
Висновки до розділу 4	140
РОЗДІЛ 5 ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ	142
5.1 Розроблення технології укладання залізобетонного безбаластного мостового полотна на прокладний шар із розробленого композиту	142
5.2 Розроблення технології ремонту безбаластного мостового полотна із заміною прокладного шару без знімання плит	146
5.3 Оцінка соціально-економічної ефективності	149
5.4 Використання результатів досліджень у навчальному процесі	150
Висновки до розділу 5	151
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	152
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	155
ДОДАТКИ	169
ДОДАТОК А Список наукових праць здобувача	170
ДОДАТОК Б Результати досліджень фізико-механічних властивостей композитів	175
ДОДАТОК В Результати дослідження гідрофізичних властивостей композиційних матеріалів	226
ДОДАТОК Г Патенти на корисну модель та заявки на видачу патентів на винахід	231
ДОДАТОК Д Технологічний регламент ремонту	235
ДОДАТОК Е Акти впровадження результатів досліджень	243

ВСТУП

На залізницях України експлуатується значна кількість залізничних мостів і шляхопроводів – металевих, залізобетонних, бетонних, кам'яних. Великі мости часто є комбінованими, з великими русловими прогонами – металевими, береговими меншої довжини – залізобетонними (рис. В.1). На залізобетонних, бетонних, кам'яних, деяких металевих мостах рейкова колія укладена в основному на баласті, засипаному в баластове корито. Така верхня будова колії за конструкцією та деформаційними характеристиками близька до звичайної колії на земляному полотні.



Рисунок В.1 – Дарницький міст у м. Київ, на першому плані – новий залізнично-автодорожній, на другому плані – старий залізничний. Руслові прогони – сталеві ферми, берегові прогони – балкові металеві (нового мосту) та залізобетонні (старого мосту)

На більшості металевих мостів улаштовується безбаластне мостове полотно на залізобетонних плитах, яке укладається на металеві балки прогонових споруд. Елементом сполучення плит БМП з балками є гумодерев'яний прокладний шар. Його перевагами є простота і технологічність. Проте він має невисоку довговічність і через біологічні пошкодження деревини з втратою нею фізико-механічних властивостей може спричинити швидкі розлади колії. Через це розробка нового довговічного швидкотверднучого композиційного матеріалу і конструктивно-технологічного рішення прокладного шару під БМП із нього є актуальними завданнями.

Актуальність теми підкреслюється тим, що в теперішній час в Україні через військову агресію росії пошкоджена та зруйнована величезна кількість будівельних об'єктів [1], у т.ч. залізничних мостів як залізобетонних, так і металевих з наскрізними фермами (рис. В.2, а [2]) та балкових (рис. В.2, б [3]). В залежності від ступеня пошкодження вони вимагають ліквідації із заміною новими або відновлення та ремонту [1, 4]. Металеві прогонові будови в багатьох випадках підлягають відновленню та ремонту, оскільки по-перше, менше пошкоджуються навіть під час падіння з опор (рис. В.2), по-друге, в них можуть замінюватись та підсилюватись окремі елементи. Залізобетонні прогонові будови ламаються, їх бетон подрібнюється, вони не підлягають ремонту та їх доцільно замінювати на балкові металеві. Отже, на переважній більшості зруйнованих мостів під час їх відновлення буде влаштовуватись безбаластне мостове полотно, яке доцільно укласти на прокладний шар із зазначеної композиції. Крім того, залізнична інфраструктура України найближчими роками має бути інтегрована в залізничну інфраструктуру Європейського союзу, для чого необхідна реконструкція її об'єктів [4, 5], зокрема металевих мостів із залізобетонним безбаластним мостовим полотном з улаштуванням надійних і довговічних рішень сполучення між ними.

a)*б)*

Рисунок В.2 – Зруйновані під час військових дій в Україні
металеві залізничні мости:

a – балковий [2];

б – з наскрізними фермами [3]

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконувалась на кафедрі залізничної колії і транспортних споруд Українського державного університету залізничного транспорту у складі держбюджетних науково-дослідних робіт Міністерства освіти і науки України: «Теоретичні та експериментальні основи визначення, прогнозування та забезпечення несучої здатності та довговічності транспортних споруд в умовах агресивних впливів» (2019-2021, ДР№ 0119U100295); «Теоретичні та експериментальні основи створення композиційних матеріалів на основі мінеральних в'язучих для захисту від електрокорозії і ремонту споруд залізничного транспорту» (2022-2023, ДР№ 0122U002125).

Мета дослідження – створення дисперсно-армованого композиційного матеріалу на основі цементу і поліефірних волокон, придатного за фізико-механічними властивостями для прокладного шару залізничного безбаластного мостового полотна.

Об'єкт досліджень – фізико-механічні, у т.ч. деформативні властивості дисперсно-армованого композиційного матеріалу на основі цементу і поліефірних волокон і процес їх формування.

Предмет досліджень – дисперсно-армований композиційний матеріал на основі цементу і поліефірних волокон для прокладного шару залізничного безбаластного мостового полотна.

Завдання досліджень:

1. Аналіз конструкції, технології улаштування і особливостей експлуатації прокладного шару між безбаластним мостовим полотном із залізобетонних плит і подовжніми балкам залізничних металевих мостів, аналітичний огляд в'язучих речовин і волокон, придатних для створення дисперсно-армованого композиційного матеріалу на основі цементів для прокладного шару.

2. Аналіз хімічного складу, структури, технології отримання, електроповерхневих властивостей волокон для дисперсного армування на предмет взаємодії з продуктами гідратації цементів.

3. Аналіз електроповерхневих властивостей продуктів гідратації цементів на предмет взаємодії з волокнами.

4. Розробка схем електрогетерогенних контактів і структури композиційного матеріалу, які забезпечать потрібні фізико-механічні властивості дисперсно-армованого матеріалу.

5. Оптико-мікроскопічні, електронно-мікроскопічні дослідження, мікрорентгенівський аналіз дисперсно-армованого матеріалу на основі цементів.

6. Дослідження фізико-механічних властивостей традиційного прокладного шару.

7. Дослідження залежностей фізико-механічних властивостей композиційного матеріалу від його складу, розробка складу матеріалу, перевірка на морозостійкість.

8. Розроблення конструктивно-технологічних рішень улаштування та ремонту безбаластного мостового полотна із застосуванням дисперсно-армованого композиційного матеріалу, впровадження результатів досліджень.

Наукова новизна: набули подальшого розвитку уявлення про вплив структури та характеру взаємодії між продуктами гідратації і поверхнями волокон на фізико-механічні властивості дисперсно-армованого матеріалу на основі портландцементу, глиноземистого цементу, поліефірних волокон. Встановлені функціональні групи, які є активними центрами на поверхні поліефірних волокон і забезпечують їх електроповерхневі властивості, знаки та величини електроповерхневих потенціалів продуктів гідратації глиноземистого цементу.

Вперше встановлено, що в дисперсно-армованому матеріалі на основі глиноземистого цементу та поліефірних волокон електрогетерогенні

контакти з негативно зарядженими активними поверхневими центрами волокон утворюють кристали гідроалюмінату кальцію C_3AH_6 , з кристалами C_3AH_6 і поверхнями заповнювача – гель гідроксиду алюмінію $Al(OH)_3$.

Вперше встановлені залежності фізико-механічних властивостей дисперсно-армованого матеріалу на основі портландцементу, глиноземистого цементу, поліефірних волокон, від співвідношення вмісту заповнювача та цементу в мінеральній суміші, витрати мінеральної суміші на одиницю площі волокнистого матеріалу, ступеня ущільнення матеріалу.

Достовірність результатів досліджень забезпечена коректним застосуванням і метрологічним забезпеченням стандартних та оригінальних методів випробувань та досліджень, застосуванням незалежних методів досліджень, повторюваністю результатів випробувань, їх статистичною обробкою, узгодженістю результатів експериментальних і теоретичних досліджень.

Практичне значення отриманих результатів полягає у забезпеченні збільшення міжремонтного періоду для безбаластного мостового полотна в середньому з 12,5 до 17,5 років, отже, на 40 %, підвищенням довговічності безбаластного мостового полотна з 12,5 до 30 років, отже, у 2,45 рази, проведенням ремонтних робіт без припинення руху поїздів замість ремонту у «вікна» тривалістю 6 годин, а також у наданні відповідних знань майбутнім фахівцям галузі шляхом впровадження в початковий процес.

Особистий внесок. Теоретичні та експериментальні дослідження виконано як особисто, так і спільно з науковим керівником та співавторами публікацій, список яких наведено в рефераті, а також додатку. Згідно з нумерацією джерел в цьому списку у [1, 5, 9, 10, 12, 13, 21–24] особисто виконано критичний аналіз конструктивно-технологічних рішень сполучення залізобетонного безбаластного мостового полотна та матеріалів, експлуатованих в прокладному шарі та інших придатних для нього, у [2, 3, 6, 7, 8, 14–17, 19] взято участь в аналізі навантажень та впливів, у т.ч. від швидкісних режимів, на елементи верхньої будови колії, зокрема особисто

узагальнено із цих джерел навантаження та впливи, які діють на безбаластне мостове полотно та прокладний шар під ним, у [1, 5, 18] на основі нових даних виконано аналіз результатів розрахункових експериментів та уточнено вимоги до потрібних фізико-механічних характеристик прокладного шару, у [4, 11] з'ясовано особливості дослідження фізики-хімічними методами контактної зони між продуктами гідратації цементів і органічними матеріалами в умовах експлуатації електрифікованої залізниці, у [1, 2, 5, 9, 10, 12] разом зі співавторами проведено експериментальні дослідження залежностей фізико-механічних властивостей композиційного матеріалу від його складу, для яких особисто розроблено методику, виконано аналіз результатів та отримано кількісні залежності, у [20] з'ясовано нормативні джерела, які визначають міжремонтні терміни залізничної колії, звідки особисто узагальнено міжремонтні терміни для безбаластного мостового полотна, у [21–24] особисто розроблено рецептури композиційного матеріалу для прокладного шару. Завдання досліджень та висновки сформульовані разом з науковим керівником, висунуто робочу гіпотезу та отримано положення наукової новизни – особисто.

Апробація результатів дисертації. Результати дисертаційного дослідження апробовані на: International Conference on Urban Infrastructure Sustainable Development and Renovation (MistoBud-2025, MistoBud-2024, Харків), 2025, 2024; 10 і 9 Міжнародних науково-технічних конференціях «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд і будівель на залізничному транспорті» (TransBud, Харків) 2024, 2021; Міжнародній науково-технічній конференції «Структурутворення та руйнування композиційних будівельних матеріалів та конструкцій» (Одеса), 2024; II Всеукраїнській науково-практичній конференції «BIM-технології в будівництві: Досвід та інновації» (Харків), 2023; 82 Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» (Дніпро), 2023; Міжнародній науково-технічній конференції «Органічні і мінеральні в'язучі та дорожні бетони на їх основі» (Харків),

2022; III Міжнародній науковій конференції ЕкоКомфорт та актуальні питання в будівництві (EcoComfort, Львів), 2022; Міжнародній науково-технічній конференції «Енергоефективність на транспорті» (Харків) 2020; XX International Scientific and Practical Conference International Trends in Science and Technology (Warsaw, Poland), 2019.

Публікації. За матеріалами дисертації опубліковано 24 наукові праці. Основні результати дисертаційного дослідження опубліковані у 8 наукових статтях, з яких 3 – у фахових виданнях України категорії Б, 5 – у виданнях, що індексуються НМБД Scopus, а також у 9 працях апробаційного характеру. Результати досліджень додатково відображені у 3 статтях, з яких в наукових журналах України – 2, іноземному журналі – 1, а також 2 описах до патентів на корисну модель і 2 описах до заявок на винаходи. Загальний обсяг наукових праць складає 8,0 друкарських аркушів, з яких особисто здобувачу належить 3,8 друкарських аркушів.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ І НОРМАТИВНИХ ДЖЕРЕЛ З ПИТАНЬ УЛАШТУВАННЯ ТА УТРИМАННЯ ЗАЛІЗОБЕТОННОГО БЕЗБАЛАСТНОГО МОСТОВОГО ПОЛОТНА ЗАЛІЗНИЧНИХ МОСТІВ ТА ПРОКЛАДНОГО ШАРУ ПІД НИМ

1.1 Конструкція, особливості технології улаштування та проблеми експлуатації залізобетонного безбаластного мостового полотна та прокладного шару під ним

На більшості металевих мостів (рис. 1.1) улаштовується безбаластне мостове полотно (БМП), раніше – на дерев'яних поперечинах (рис. 1.1, *а*), в теперішній час – на залізобетонних плитах (рис. 2) [6–9]. Мостове полотно укладається на головні балки балкових прогонових будов (рис. 1.1, *а*) або на подовжні балки балкової клітки прогонів з наскрізними фермами (рис. 1.1, *б*).

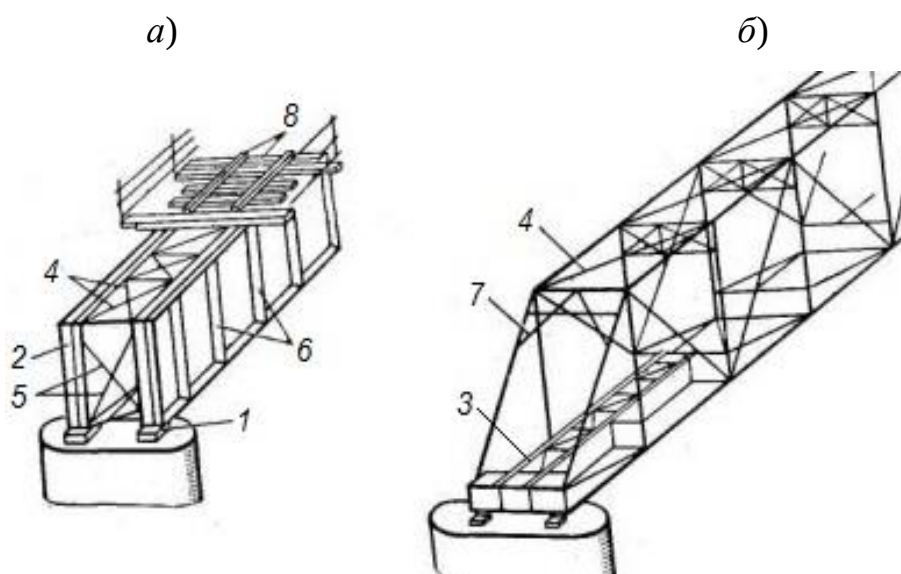


Рисунок 1.1 – Схеми конструкції прогонових будов металевих мостів:

а – балкової з їздою поверху; *б* – з наскрізною фермою з їздою понизу; 1 – опорні частини; 2 – головна балка; 3 – подовжня балка; 4 – подовжні зв'язки; 5 – поперечні зв'язки; 6 – ребра жорсткості; 7 – порталне заповнення; 8 – мостове полотно з рейковою колією

Мостове полотно на дерев'яних поперечинах через його низьку довговічність та дефіцит якісної деревини вже близько 30 років у плановому порядку замінюється БМП із залізобетонних плит [10]. Плити БМП (рис. 1.2) [6, 7] виготовляють шириною відносно осі колії 3200 мм, чотирьох основних типорозмірів на 3 і 4 пари підрейкових площадок довжиною відносно осі колії 1390 і 1890 мм для епюри шпал 1840 шт./км і 1490 і 1990 мм – для епюри шпал 2000 шт./км. Кожний із цих типорозмірів має різновиди, призначені для укладання на мости з відстанню між подовжніми балками в осях 1900, 2000, 2100 і 2200 мм.

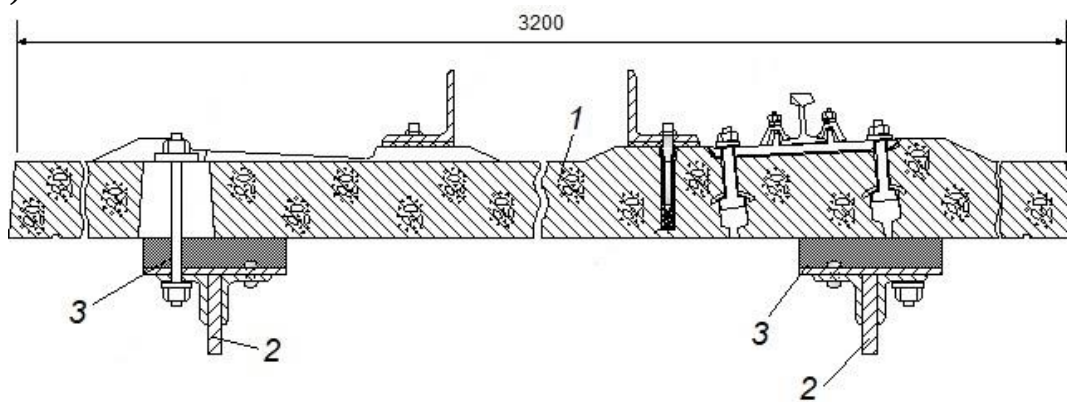
Традиційним елементом сполучення плит БМП зі сталевими подовжніми балками мосту є гумодерев'яний прокладний шар 4 рис. 1.2. Його влаштовують в такому порядку [7]. Заздалегідь заготовляють елементи прокладного шару – нарізають дошки із деревини 3 і смуги із армованої гуми 4 сумарною товщиною, що відповідає проєктній товщині прокладного шару. На верхню полицю сталевих балок перед укладанням плит укладають спочатку дошки 3, а зверху – армовану гуму 4, або тільки армовану гуму. Цей спосіб забезпечує рівномірне обпирання плит на подовжню балку, проте не забезпечує довговічності прокладного шару і мостового полотна в цілому [11–14]. Внаслідок гниття під впливом дереворуйнівних грибів деревина втрачає фізико-механічні властивості, що обумовлює нерівномірне осідання плит, утворення у них тріщин, розлад залізничної колії у плані та профілі, та вимагає заміни через 10–15 років експлуатації [15–19].

Отже, перевагами гумодерев'яного прокладного шару є простота і технологічність. Проте він має невисоку довговічність 10–15 років і через біологічні пошкодження деревини з втратою нею фізико-механічних властивостей може спричинити швидкі розлади колії.

а)



б)



в)

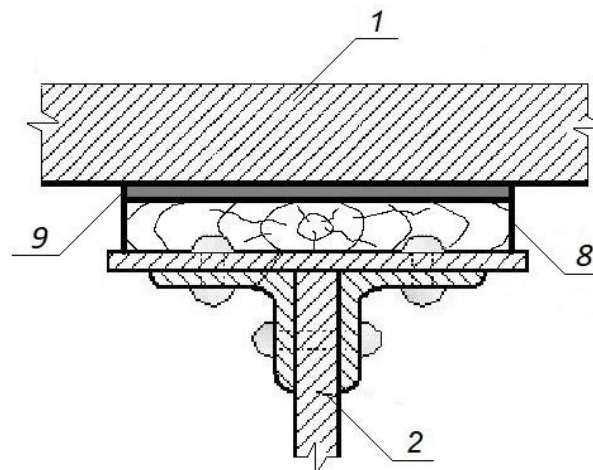


Рисунок 1.2 – Безбаластне мостове полотно на залізобетонних плитах:

а – загальний вигляд; *б* – конструкція БМП; *в* – гумодерев'яний прокладний шар; 1 – плита БМП; 2 – подовжня (головна) балка прогонової будови; 3 – прокладний шар; 8 – дерев'яна дошка прокладного шару; 9 – гумова частина гумодерев'яного прокладного шару

1.2 Альтернативні конструктивно-технологічні рішення прокладного шару під залізобетонного безбаластного мостового полотна та матеріали для них

Під час впровадження безбаластного мостового полотна із залізобетонних плит спочатку їх укладали на прокладному шарі із армованого бетону або цементного розчину [20, 21]. Але він виявився недовговічним в місцях, де його товщина була менше, ніж 20–30 мм [14, 21]. Це відбувалось через те, що, на нашу думку, цементні бетони та розчини в тонких прошарках недостатньо стійкі до складних впливів, коли вони зазнають одночасно динамічних навантажень, усадки від поперемінного зволоження та висушування та інших причин [22, 23, 24], заморожування та відтавання [25], електричних впливів різної природи [26, 27], у т.ч. струмів витоку [28, 29, 30], а також можуть піддаватись внутрішній корозії [31], і навіть, як і гумодерев'яний прокладний шар, ще й біопошкодженням [32]. Виготовлення тонкого прокладного шару належної якості, зокрема однорідності, ускладнюється ще й складністю забезпечення потрібних реологічних характеристик суміші [33] з урахуванням гранулометричного складу заповнювачів [34].

Довговічними виявились різновиди наливного полімеркомпозиційного прокладного шару [35–38]. У відповідності до [35, 38] полімеркомпозиційний прокладний шар (рис. 1.3) улаштовується в наступному порядку. На верхню полицю балок мосту встановлюють локальні опори 3 (рис. 1.3) висотою, що відповідає проєктній товщині прокладного шару (через нерівності та деформації конструкцій мосту коливається по його довжині в межах від 10 до 80 мм), а по її краям – опалубку 4. На локальні опори 3 встановлюють плиту 2 і в утворену порожнину між верхньою полицею балки, опалубкою і нижньою гранню плити через технологічні отвори у плиті 5 заливають рухома суміш 6 на основі мінерального в'язучого та/або полімеру. В результаті твердіння суміші утворюється прокладний шар, що

характеризується високою міцністю та довговічністю – термін його служби складає не менше 30 років. Проте в місцях, де проектна товщина прокладного шару менше ніж 20-30 мм, цей спосіб не забезпечує рівномірного заповнення сумішшю зазначеної порожнини та рівномірне обпирання плити на подовжню балку, що у близько 14 % плит обумовлює утворення тріщин під час експлуатації та, відповідно, їх передчасний вихід із експлуатації [12, 16] (рис. 1.4). Отже, лише 86 % нового прокладного шару, улаштованого цим способом, можна вважати бездефектним.

Крім того, через трудомісткість улаштування епоксидно-кам'яновугільна композиція [35, 38] не набула розповсюдження, а поліуретанова еластична композиція у сполученні з розташуванням рейок у рейкових каналах плит БМП [37] в Україні знайшла застосування лише в трамвайних коліях.

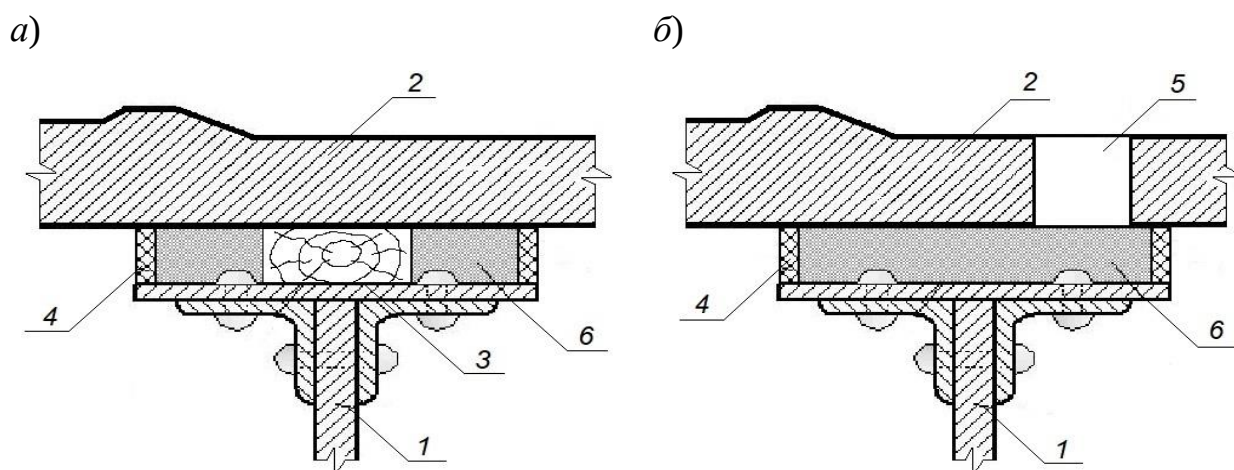


Рисунок 1.3 – Схема улаштування прокладного шару заливанням рухомої суміші на основі мінерального в'язучого та/або полімеру – поперечні перерізи: *а* – в місці встановлення локальної опори; *б* – поза місць встановлення локальних опор; 1 – подовжня сталева балка залізничного мосту; 2 – залізобетонна плита безбаластного мостового полотна; 3 – локальна опора; 4 – опалубка; 5 –технологічний отвір у плиті; 6 – рухома суміш на основі мінерального в'язучого та/або полімеру, що твердіє

Через це розробка нового довговічного швидкотверднучого композиційного матеріалу і конструктивно-технологічного рішення прокладного шару під БМП із нього, які б поєднували переваги і виключали недоліки гумодерев'яного та полімеркомпозиційного прокладних шарів є актуальними завданням.

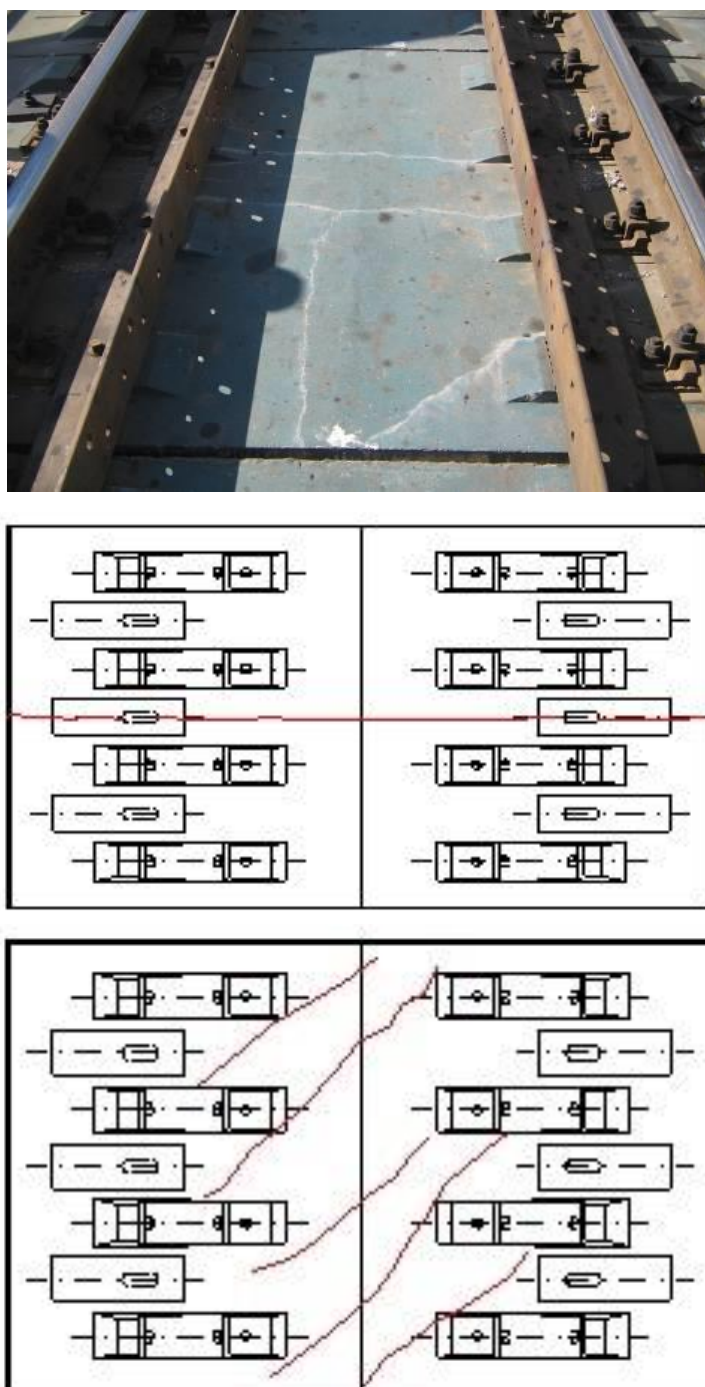


Рисунок 1.4 – Тріщини у плитах БМП через нерівномірне обпирання на прокладний шар

1.3 Потрібні фізико-механічні властивості прокладного шару

Напружено-деформований стан конструкцій, які повністю або частково опираються на суцільні основи, та самих цих основ суттєво залежить від деформативних властивостей, ступеня ущільнення тощо цих основ [16–19, 39]. Виконано аналіз переваг і недоліків безбаластних конструкцій мостового полотна на різному прокладному шарі. Багато авторів з'ясовували ці недоліки і переваги шляхом аналізу напружено-деформованого стану цього вузла сполучення [16–19].

За [40] умови експлуатації баластної та безбаластної колії та на мостах з короткими та довгими прогоновими будовами принципово відрізняються. На мостах з баластною колією довготривалі деформації прогину внаслідок повзучості та усадки бетону залізобетонних прогонових будов або втоми металу металевих прогонових будов можна не враховувати, оскільки виправлення колії у профілі може бути здійснене підбиванням. На мостах з безбаластною колією та короткими прогоновими будовами довготривалі деформації прогину також можна не враховувати, але для довгих прогонових будов такі деформації та подальші розлади колії від них мають враховуватись.

Автори [41] виконали аналіз напружено-деформованого стану залізобетонного безбаластного мостового полотна в умовах динамічних впливів від високошвидкісного рухомого складу: зроблено висновки про наявність значних відривних зусиль БМП від подовжніх балок та про недоцільність застосування прокладного шару за межами мосту, проте пропозицій щодо коригування деформативних властивостей прокладного шару для зниження цих зусиль не надається.

У [37, 38, 42] різними розрахунковими засобами виконувався аналіз напружено-деформованого стану безбаластного мостового полотна та прокладного шару під ним під поїзними навантаженнями, передбаченими [43]. У [38] розрахунками, виконаними точними методами, встановлені

вимоги до необхідної міцності прокладного шару БМП на момент монтажу та експлуатації. За результатами розрахунків встановлено, що міцність на 1 добу має бути не меншою 1 МПа, на 2 добу – не меншою 5 МПа.

Для обґрунтування фізико-механічних характеристик прокладного шару у [42, 44] виконувались розрахункові експерименти і аналіз НДС плити БМП і самого шару. Експерименти проводилися за методикою [45] методом скінчених елементів у просторовій постановці за допомогою програмного комплексу ЛИРА-САПР. Розрахункову схему складали із 38992 об'ємних фізично нелінійних ізопараметричних скінчених елементів №№ 234 і 236 з кількістю вузлів 45126. У моделі контакт між прокладним шаром і плитою не розкривається, прокладний шар опирали на абсолютно жорстку основу. Перемінними параметрами приймали модуль деформації прокладного шару (3, рис. 1.2, *a*) зі значеннями 2000, 10000, 35000 МПа як у полімерних композитів, деревини сосни, бетону класу С32/40, відповідно, та силу натягу високоміцних шпильок (рис. 1.2, *a*) кріплення плити до подовжньої балки – 49, 98 і 128 кН. Натяг шпильок моделювали навантаженням, прикладеним через пластину-шайбу.

Модель плити БМП завантажували етапами кроками по 20 % на кожному етапі, на першому – власною вагою плит і натягом шпильок, на другому – власною вагою, натягом шпильок і тимчасовим навантаженням 245 кН однієї осі рухомого складу. Розрахунок здійснювали шагово-ітераційним методом. Деякі найбільш наочні поля напружень наведені на рис. 1.3.

Розтягувальні напруження до 1,81 МПа, що наближаються до границі міцності бетону на розтяг, були виявлені на верхній грані плит саме в місцях, де під час експлуатації часто утворюються тріщини [42, 44]. За результатами аналізу напружено-деформованого стану БМП у [42, 44, 46] для зниження напружень у плитах і самому прокладному шарі запропоновано застосовувати жорсткий прокладний шар з модулем деформації понад 10000 МПа, а натяг шпильок здійснювати силою, що не перевищує 98 кН, бо за

більших величин натягу напруження у плиті збільшуються та наближаються до величин границі міцності бетону. Проте відомо, що застосування дерев'яного прокладного шару без гуми призводило до збільшення пошкоджуваності БМП, отже, доцільно переосмислити результати [42, 44, 46], а також дослідити деформативні характеристики гумодерев'яного прокладного шару.

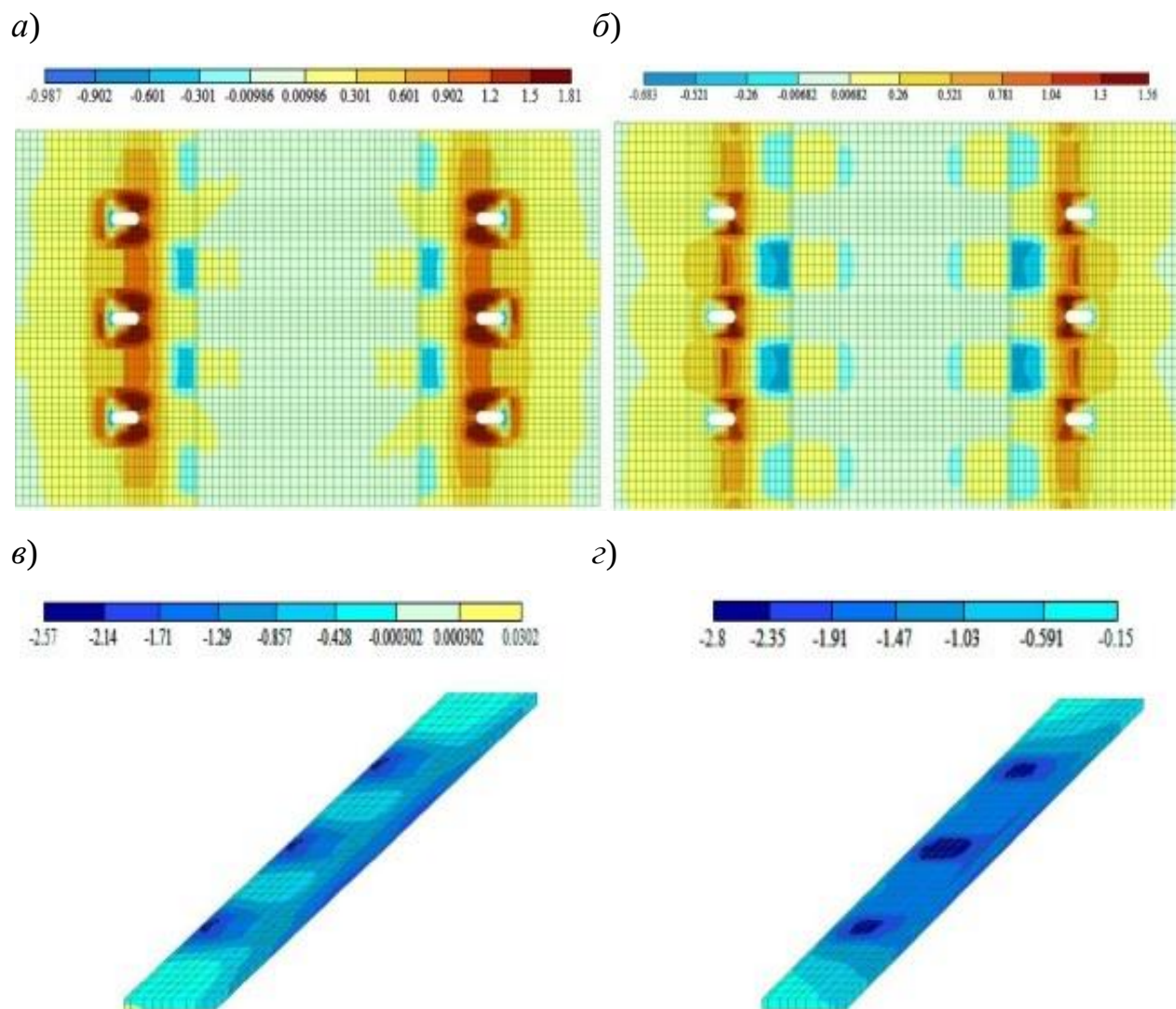
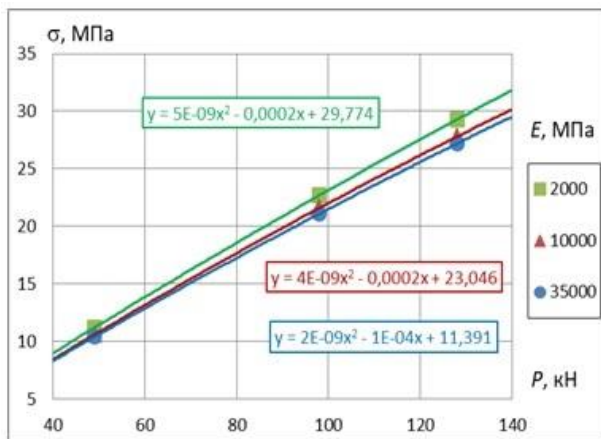
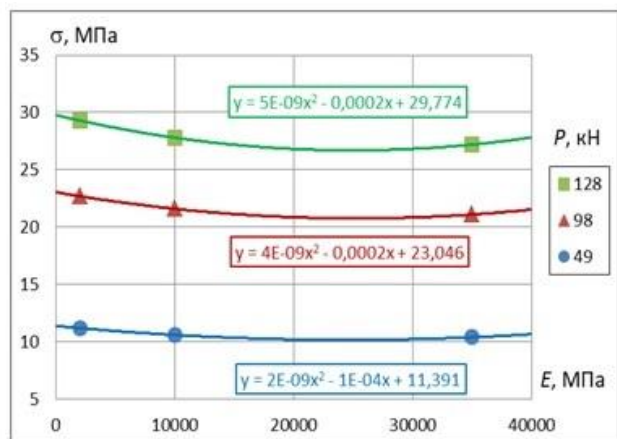


Рисунок 1.5 – Ізополя напружень у верхній грані плити БМП (а, б) і прокладному шарі (в, г) для значень модуля деформацій прокладного шару і натягу шпильок, відповідно: 35000 МПа і 128кН (а, в); 5000 МПа і 49 кН (б, г)

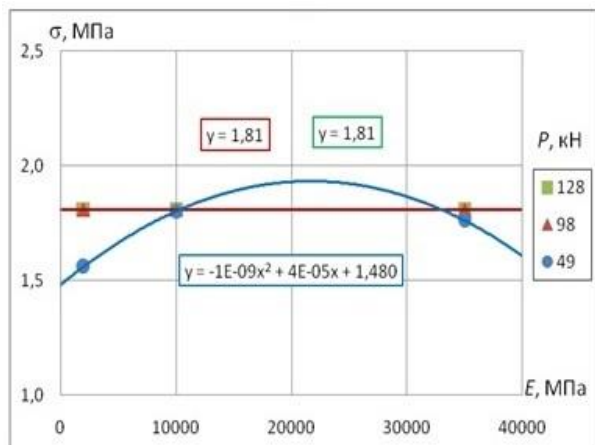
а)



б)



в)



г)

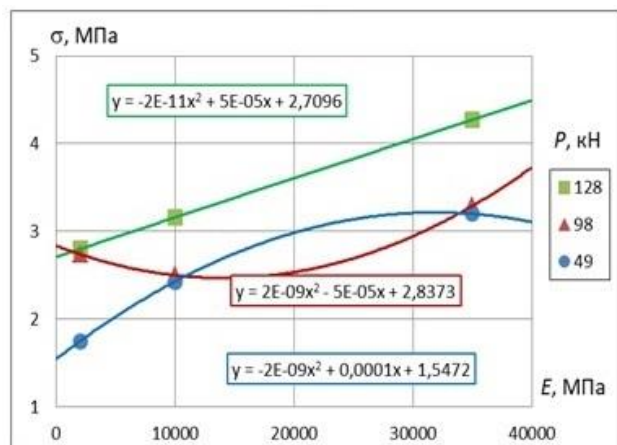


Рисунок 1.6 – Залежності максимальної величини напружень σ від модуля деформації прокладного шару E за різних зусиль натягу шпильок P :

$a, б$ – в плиті БМП стискаючих (a) та розтягувальних у верхній грані ($б$); $в$ – у прокладному шарі стискаючих

На рис. 1.3 наведено отримані за результатами розрахунків оновлені залежності максимальних напружень в плиті БМП ($a, б$) та прокладному шарі ($в, г$) від величини сили затягування високоміцних шпильок за різних величин модуля деформації прокладного шару (a) та від модуля деформації прокладного шару за різних значень сили затягування шпильок.

Із рис. 1.4 видно, що на величину напружень впливає в більшому ступені сила натягу шпильок, в меншому – модуль деформації прокладного шару – зі зниженням їх значень напруження також зменшуються.

Таким чином, міцність матеріалу прокладного шару через 6–8 годин твердіння має бути не меншою 1 МПа, у віці 2 доби та більше – не меншою 5 МПа, модуль деформації повинен бути не більшим 10000 МПа, бажано близьким до модуля деформації гумодерев'яного покладного шару. Аналіз показує, що найбільш придатною для прокладного шару може бути швидкотверднуча дисперсно-армована композиція на основі мінеральної в'язучої речовини [47, 48]. Саме за таких умов очікується мінімальний розвиток дефектів і пошкоджень елементів верхньої будови колії на безбаластній підрейковій основі. Результати аналітичного огляду та досліджень впливу конструкції, особливостей технології улаштування, режимів експлуатації залізничної колії на різних підрейкових основах на розвиток дефектів і пошкоджень її елементів наведено у [44, 49–53].

1.4 Аналітичний огляд в'язучих речовин і композиційних матеріалів, придатних для улаштування прокладного шару під безбаластним мостовим полотном

1.4.1 Прискорення твердіння портландцементу

Виконано аналіз літературних джерел щодо в'язучих речовин і композиційних матеріалів, які здатні забезпечити визначені властивості прокладного шару під безбаластним мостовим полотном.

Найбільш масовою і доступною в'язучою речовиною є цемент загальнобудівельного призначення на основі портландцементного клінкеру. Для матеріалів на основі портландцементу міцність на стиск 5 МПа є з великим запасом досяжною величиною навіть за природного твердіння.

Проте особливістю портландцементу, яка стримує його застосування для прокладного шару, є повільне твердіння – проектної міцності матеріали без заходів із прискорення досягають орієнтовно через місяць (традиційно встановлено 28 діб). Досягнення міцності на стиск навіть 1 МПа через менше ніж 24 години природного твердіння вимагає вживати заходів з прискорення твердіння.

Аналіз літературних джерел показав, що прискорення твердіння досягається введенням хімічних добавок – солей-електролітів, суперпластифікаторів (аніонактивних поверхнево-активних речовин) [54, 55], застосуванням цементів, що містять багатокomпонентні мінеральні добавки [56], введенням золи нанодисперсної фракції [47]. У разі застосування добавок суперпластифікаторів прискорення твердіння і набуття більш високих фізико-механічних властивостей обумовлене в основному зниженням водоцементного відношення. У разі введення солей-електролітів прискорення твердіння та підвищення показників фізико-механічних властивостей багато авторів пов'язують з взаємодією цих солей з алюмінатними фазами портландцементного клінкеру з утворенням *AFm* і *AFt*-фаз – гідросульфо-, гідронітро-, гідрокарбо-, гідрохлоралюмінатів кальцію [57, 58].

Уведення золи нанодисперсної фракції на думку авторів [47] прискорює гідратацію цементу за рахунок того, що наночастинки золи відіграють роль центрів кристалізації. Вважаємо це трактування дещо обмеженим, оскільки такі частинки у лужному середовищі швидко розчиняються і взаємодіють з вапном, отже, прискорюють утворення гідросилікатів кальцію та сприяють їх більш рівномірному розподілу по структурі продуктів гідратації.

Автори [59, 60] для гідроізоляційних цементних композицій проникної дії пропонують комплекс хімічних добавок – солей-електролітів і суперпластифікатора (аніонактивної поверхнево активної речовини), який за рахунок утворення *AFm* і *AFt*-фаз не тільки забезпечує водонепроникність

конструкцій із бетону, що ізолюються, а й здатний суттєво прискорити твердіння портландцементу та відіграти роль інгібітору корозії сталі. Крім того, у [59, 60] для запобігання утворення усадкових тріщин пропонується дисперсне армування полімерними волокнами, яке, як ми вважаємо, сприятиме підвищенню також і ранньої міцності.

Проте сполучення хімічних та мінеральних добавок з дисперсним армуванням стосовно прокладного шару БМП необхідно ретельно досліджувати та обґрунтовувати. Так, автори [48] досягли максимального підвищення статичної міцності цементної композиції добавками керамічного порошку та 0,25 % базальтового волокна. Подальше збільшення вмісту волокна обумовило зниження статичної міцності, проте подальше зростання динамічної міцності.

1.4.2 Кальцієво-алюмінатні цементи

Із цементів, що випускаються промислово та наявні на ринку, найбільш швидкоотверднувачими є глиноземисті (кальцієво-алюмінатні) цементи [62–66]. Глиноземистий цемент – швидкоотверднуча гідралічна в'язуча речовина, яку отримують помелом обпаленої до сплавлення або спікання сировинної суміші, складеної із бокситів і вапна або вапняку. Отже, сировинна суміш містить переважно глинозем і оксид кальцію, а готовий цемент складається із низькоосновних алюмінатів кальцію.

Вимоги до глиноземистих цементів в Україні та світі регулюються національними та міжнародними стандартами [67].

Терміни тужавлення глиноземистого цементу нормальні – початок тужавлення не раніше 45 хвилин, кінець – не пізніше 12 годин.

Глиноземисті цементи є швидкоотверднувачими – їх марки встановлені для проектного віку 3 доби та відповідають міцності на стиск 40, 50 і 60 МПа. Міцність матеріалів на глиноземистому цементі в різні періоди твердіння

зазнає спадів та підйомів [62–65]. Чим швидше відбувається гідратація цементу, тим суттєвішими є спади міцності.

Під час твердіння глиноземистого цементу за короткий проміжок часу виділяється значна кількість тепла, з якого 70–80 % – за першу добу, що призводить до значного розігріву. Тому глиноземистий цемент порівняно з портландцементом більш придатний для твердіння за знижених температур.

Бетони і розчини на глиноземистому цементі більш щільні, водонепроникні, корозійно стійкі ніж бетони і розчини на портландцементі. Бетони та розчини на глиноземистому цементі є морозостійкими.

Глиноземистий цемент використовують для виготовлення швидкотверднучих будівельних і жаростійких розчинів і бетонів, призначених для швидкісного будівництва, аварійних робіт, зимового бетонування, споруд, що зазнають впливу мінералізованих вод і сірчаних газів. Більш широке застосування глиноземистих цементів стримується обмеженою сировинною базою та високою собівартістю виробництва.

Вказані властивості глиноземистих цементів визначаються їх хімічним та мінеральним складом. Узагальнено дані [63–69], результати яких наступні.

Хімічний склад глиноземистого цементу: CaO – 35–45 %; Al_2O_3 – 30–50 %; SiO_2 – 5–15%; Fe_2O_3 – 5–15 %.

В залежності від вмісту Al_2O_3 глиноземистий цемент виробляють звичайний – з вмістом Al_2O_3 35–48 %, високоглиноземистий – 60–65 %, особливо чистий високоглиноземистий – 70 % та більше. В залежності від вмісту CaO глиноземистий цемент може бути висококальцієвим – з вмістом CaO понад 40 % та низькокальцієвим – менше 40 %.

Мінерали глиноземистого цементу: моноалюмінат кальцію $CaO \cdot Al_2O_3$ (CA); п'ятикальцієвий триалюмінат $5CaO \cdot 3Al_2O_3$ (C_5A_3); діалюмінат кальцію $CaO \cdot 2Al_2O_3$ (CA_2). Мінералогічний склад суттєво варіюється в залежності від хімічного складу сировини та способу виробництва. Основним мінералом є моноалюмінат кальцію CA . У висококальцієвих цементах разом з ним міститься C_5A_3 , у низькокальцієвих – CA_2 .

CA утворюється внаслідок твердофазової реакції або кристалізації з розплаву. Залежно від умов утворення кристали CA є призматичними, дендритними, скелетними. CA часто утворює тверді розчини з феритом, хромітом тощо. Чистий CA характеризується нормальними термінами тужавлення, високою міцністю в ранні терміни твердіння, рівномірним зростанням міцності без скидів.

C_5A_3 утворюється у двох модифікаціях – стійкою, яка переважає у глиноземистих цементах, та нестійкою. Уточнена формула C_5A_3 – $12CaO \cdot 7Al_2O_3$ ($C_{12}A_7$). Деякі дослідники вважають, що C_5A_3 є сполукою $6CaO \cdot 4Al_2O_3 \cdot FeO \cdot SiO_2$, в якій FeO може заміщуватись MgO , а SiO_2 – TiO_2 . Чистий C_5A_3 характеризується швидким тужавленням, високою міцністю в ранні терміни твердіння, проте яка потім знижується.

CA_2 також утворюється у двох модифікаціях – стійкою, яка переважає у глиноземистих цементах, та нестійкою. Формулою CA_2 раніше вважали $3CaO \cdot 5Al_2O_3$ (C_3A_5). Стійка форма утворює крупні голчасті призматичні кристали. В чистому виді CA_2 гідратує, тужавіє та твердіє повільніше інших алюмінатів кальцію, але характеризується високою міцністю через тривалий час.

В глиноземистих цементах в залежності від складу сировини (домішок в бокситах тощо) можуть міститись також силікати та алюмосилікати, залізовмісні та магнезіальні сполуки, титанати тощо.

Силікати представлені белітом $2CaO \cdot SiO_2$ (C_2S), алюмосилікати – геленітом $2CaO \cdot SiO_2 \cdot Al_2O_3$ (C_2SA). C_2S звичайно зустрічається у вигляді зерен круглої форми, часто у вигляді двійників. C_2S повільно твердіє і обумовлює зниження міцності глиноземистих цементів у ранні терміни.

C_2SA кристалізується у таблитчастій або призматичній формі, часто утворює хрестоподібні форми або тонкоструктурні проростання з CA . C_2SA є практично гідравлічно неактивним. Його активність дещо підвищується у вапняно-гіпсовому розчині. Склоподібний і дрібнокристалічний C_2SA мають більшу гідравлічну активність, ніж крупнокристалічний. Під час

мінералоутворення на C_2SA витрачається Al_2O_3 , що обумовлює зменшення вмісту активних алюмінатів кальцію. Для запобігання цьому необхідно намагатись мінімізувати вміст SiO_2 у сировинній суміші та, відповідно, готовому цементі. Проте SiO_2 в невеликій кількості (до 4–5 %) сприяє активності цементу, очевидно, через здатність CA розчиняти його у своїй кристалічній решітці.

Залізовмісні сполуки представлені твердими розчинами в межах складів $C_6A_2F - C_2F$. Можлива також присутність $2CaO \cdot Fe_2O_3$ (C_2F), $CaO \cdot Fe_2O_3$ (CF), Fe_3O_4 і FeO .

Магnezіальні сполуки представлені магnezіальною шпинеллю $MgO \cdot Al_2O_3$, можуть бути присутніми також периклаз MgO , окерманит $2CaO \cdot MgO \cdot 2SiO_2$, четверна сполука $6CaO \cdot 4Al_2O_3 \cdot MgO \cdot SiO_2$. Зазначені сполуки гідралічно малоактивні, проте зв'язують глинозем, тому погіршують активність цементу.

Титанати представлені гідралічно неактивним перовскітом $CaO \cdot TiO_2$, який мало впливає на властивості цементу. Кількість інших сполук вкрай мала.

Основні продукти гідратації глиноземистого цементу:

- CAH_{10} – десятиводний одонокальцієвий алюмінат $CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 10H_2O$, утворюється за температур до $+20^\circ C$ із CA , є метастабільною фазою, яка згодом перекристалізовується на C_3AH_6 ;
- C_2AH_8 – вісьмиводний двокальцієвий алюмінат $2CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 8H_2O$, утворюється за температур $\sim 20-30^\circ C$ із CA , також є метастабільною фазою, яка згодом перекристалізовується на C_3AH_6 ;
- C_3AH_6 – гідрогарніт $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 6H_2O$, термодинамічно стабільна фаза, утворюється за температур понад $30^\circ C$ або в результаті перекристалізації CAH_{10} та C_2AH_8 ;
- AH_3 – гідроксид алюмінію $Al(OH)_3$, аморфна або приховано-кристалічна фаза;

- CH_2 – гідроксид кальцію $Ca(OH)_2$ (портландит), може утворюватись у невеликій кількості залежно від співвідношення в цементі CaO/Al_2O_3 та В/Ц.
- гідросилікати кальцію можуть утворюватись лише у разі наявності в цементі домішок силікатів.

У разі тривалого тверднення або додаткового нагрівання метастабільні фази C_3AH_6 і C_2AH_8 перекристалізуються у C_3AH_6 зі зменшенням об'єму, що може спричинити зниження міцності штучного каменю.

Із зазначених продуктів гідратації гідроалюмінати кальцію C_3AH_6 , C_2AH_8 , C_3AH_6 , а також $Ca(OH)_2$ є кристалічними, $Al(OH)_3$ – аморфним гелеподібним (гель гідроксиду алюмінію). Кристалічні фази утворюють кристалічний каркас, який забезпечує міцність штучного каменю, гель гідроксиду алюмінію заповнює поровий простір каркасу та підвищує щільність каменю.

Морфологія гідрогарніту C_3AH_6 – кристали кубічної або ізометричної форми, їх дрібнозернисті щільні агрегати або чітко окреслені окремі куби. Розмір кристалів зазвичай декілька мкм, змінюється залежно від умов тверднення. Поверхня кристалів може бути гладкою або шорсткою залежно від швидкості зростання кристалів.

Глиноземистий цемент характеризується високою початковою швидкістю гідратації, яка забезпечує швидкий набір міцності. Його швидкість твердіння і ступінь гідратації залежать від умов тверднення, але зазвичай вищі, ніж у портландцементу, особливо на ранніх стадіях. Через декілька діб ступінь гідратації досягає 70–80%, тоді як у портландцементу за цей же час він становить близько 50–60%. За декілька тижнів переважна частина клінкеру гідратує, через рік гідратація майже завершується. Негідратовані частинки залишаються, але їх кількість та розміри значно менші, ніж у портландцементу. Кількість негідратованих частинок дещо більша, якщо умови тверднення не сприяли повній реакції – недостатні В/Ц, вологість середовища. Гідратації та твердіння можуть бути прискорені більш тонким помелом цементу, підвищенням температури твердіння.

pH рідкої фази твердну чого глиноземного цементу а згодом порового електроліту його цементного каменю складає 11–12, в середньому 11,5, що менше, ніж у портландцементу 12,5–13,5.

Терміни тужавлення можуть регулюватись добавками. Прискорюють тужавлення добавки гідроксидів кальцію та натрію, карбонату та гідрокарбонату ($NaHCO_3$) натрію, сульфатів натрію, кальцію та заліза, портландцемент. Уповільнюють тужавлення хлориди натрію, калію, барію, нітрат натрію, соляна кислота, гліцерин, цукор, ацетат натрію (CH_3COONa), бура (декагідрат тетраборату натрію $Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$).

Таким чином для композиційного матеріалу для прокладного шару найбільш придатними є глиноземисті цементи з максимальним вмістом CA , помірним $C_{12}A_7$, мінімальним CA_2 , силікатів, алюмосилікатів та інших супутніх сполук. Тужавлення за необхідності може бути прискорене добавками $Ca(OH)_2$, $NaOH$, Na_2CO_3 , $NaHCO_3$, Na_2SO_4 , $CaSO_4 \cdot nH_2O$, $FeSO_4 \cdot nH_2O$.

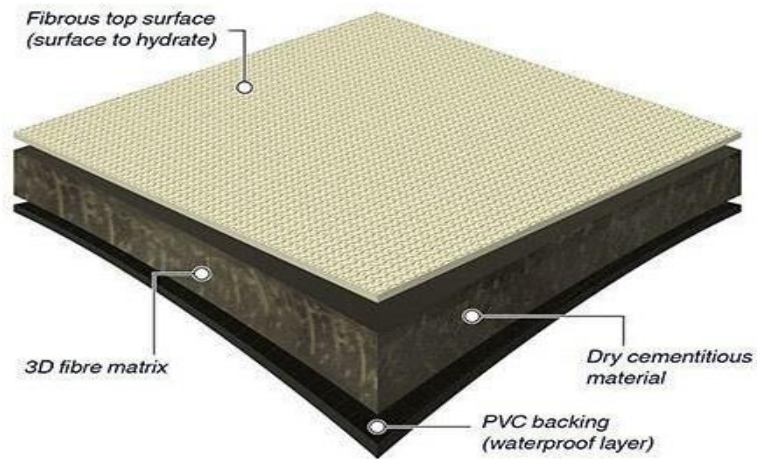
1.4.3 Дисперсне армування

Дисперсне армування полягає у анізотропному розподілі армуючих волокон в структурі бетону або іншого композиційного матеріалу. Звичайно дисперсне армування виконують фіброю – базальтовим, скляним, вугільним волокном або сталевим дротом довжиною від декількох мм до декількох см [70–73]. Набагато більш чутливими до модифікування фіброю порівняно з нормальнозернистими бетонами є дрібнозернисті бетони без крупного заповнювача, в яких фібра дозволяє суттєво підвищувати тріщиностійкість, ударостійкість та в широких межах варіювати деформативні характеристики [72–74].

На основі мінеральних в'язучих та фібри розроблені і впроваджені листові, джгутові, рулонні матеріали [75–78]. Їх водонепроникність і високі фізико-механічні показники дозволяють використовувати їх навіть для

укріплення стінок і дна водотоків (рис. 1.7) [75, 76], для гідроізоляції стиків каналізаційних труб (рис. 1.8) [78].

a)



б)



Рисунок 1.7 – Матеріал Concrete Canvas – Бетонний килим (a)
та його застосування для укріплення
водовідвідних каналів (б) [76]

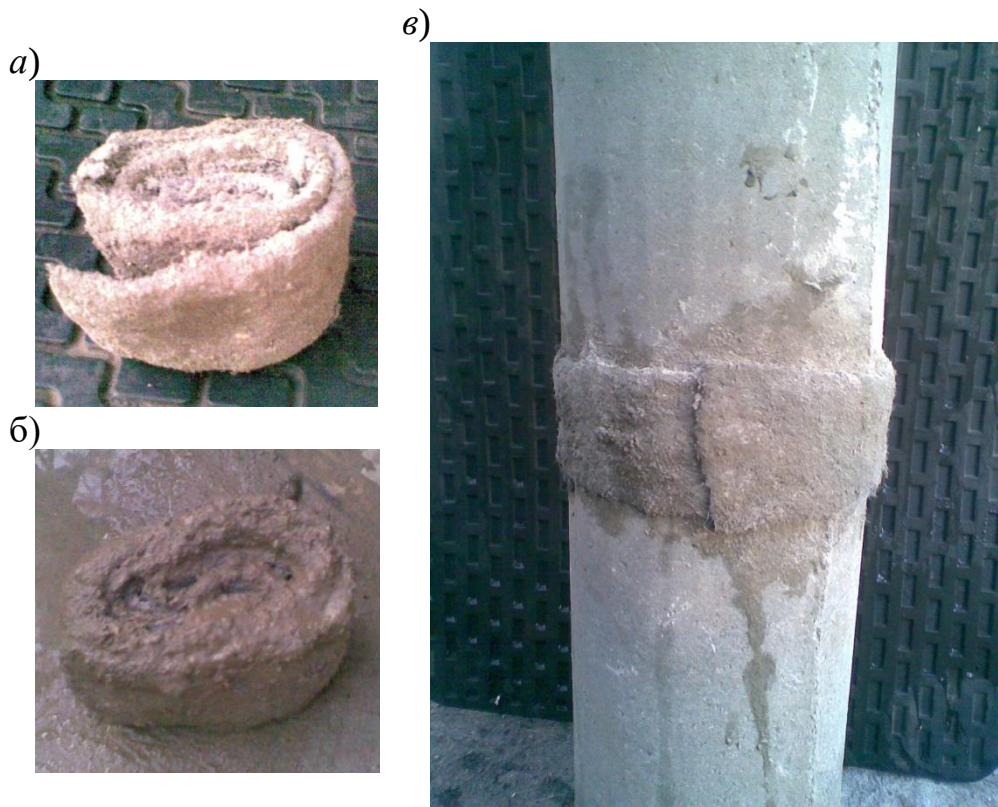


Рисунок 1.8 – Рулонний гідроізоляційний матеріал та його застосування для герметичного стикування бетонних або азбестоцементних каналізаційних труб [78]

Для армування гідроізоляційних композиційних матеріалів у [77–79] застосовано нетканий матеріал об'ємної структури – НМОС. Метою його застосування були забезпечення можливості улаштування гідроізоляції як обклеювальної та підвищення стійкості до усадкового тріщиноутворення.

Оскільки для прокладного шару висуваються підвищені вимоги до фізико-механічних властивостей, проаналізуємо склад, структуру та властивості НМОС.

НМОС широко відомий під назвою синтепон. За інформацією з відкритих джерел [80] та ін. синтепон – це неткане просторове полотно з анізотрично орієнтованих синтетичних волокон.

Для НМОС застосовують поліефірні волокна [80]. Волокна можуть бути із вторинної сировини. Синтепон виготовляється із поліефірних волокон

товщиною від 0,5 до 25 ден (ден'єр – маса волокна довжиною 9000 м, г). Тонкі волокна товщиною до 3 ден забезпечують еластичність, середні волокна товщиною 4–10 ден більш універсальні, грубі волокна товщиною понад 10 ден забезпечують підвищену щільність та міцність. На властивості синтепону впливає також довжина та спосіб з'єднання – термічний, клейовий, механічний.

Діаметр волокна в мкм:

$$d = (4\text{Ден} \cdot 10^{-6} / \pi \cdot \rho)^{0,5} \times 10^6,$$

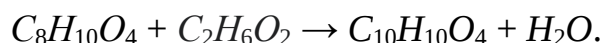
де ρ – середня густина поліефірного волокна, $\approx 1,38$ г/см³.

За цим рівнянням діаметр волокон складає: 1 ден ≈ 12 мкм; 10 ден ≈ 38 мкм; 25 ден ≈ 60 мкм.

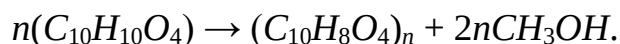
Поліефірне (поліестерне) волокно виготовляється із поліетилентерефталату (ПЕТ) [59–62]. Хімічний склад ПЕТ –



Поліетилентерефталат отримують із терефталевої кислоти $\text{C}_6\text{H}_4(\text{COOCH}_3)_2$ (або $\text{C}_8\text{H}_{10}\text{O}_4$) та етиленгліколю $\text{C}_2\text{H}_4(\text{OH})_2$ (або $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}_2$). В результаті їх взаємодії – естерифікації утворюється диметилтерефталат:



Подальша поліконденсація відбувається за рахунок взаємодії диметилтерефталату також з етиленгліколем:



Властивості ПЕТ: молярна маса перемінна; середня густина $\sim 1,38$ г/см³, густина аморфного – 1,37 г/см³, монокристалічного – 1,455 г/см³; показник заломлення n_D – 1.57–1.58; температура плавлення – понад 250–260 °С, температура кипіння (розкладання) – понад 350°С; практично нерозчинний у

воді, не поглинає воду, вологостійкий; кислотостійкий та стійкий до дії більшості органічних розчинників.

На завершальному етапі виготовлення волокна на нього наносять різні технічні речовини в кількості 0,1–1% від маси волокна:

- змащувачі (для зменшення тертя між волокнами або між волокнами та обладнанням) – силікони, парафіни, емульсії мінеральних олій;
- адгезиви (для збільшення зчеплення матеріалів матриці з волокном) – поліуретани, інші полімери;
- антистатики – поліетиленгліколь, інші полімери;
- гідрофобизатори – фторвуглецеві сполуки;
- гідрофілізатори – ефіри поліетиленгліколю;
- бактерициди – сполуки, що містять срібло тощо;
- барвники, фіксатори.

З них змащувачі наносяться в усіх випадках в кількості 0,1–1% від маси волокна. Під час виробництва синтепону поверхню волокон від технічних речовин не очищують і вони залишаються в незначній кількості.

За способом отримання із волокон НМОС є: каландровий – термоскріплений (зі сплавленням волокон) і клейовий (зі склеюванням волокон); голкопробивний – отриманий прошиванням полотна.

Різновиди та модифікації НМОС за матеріалом волокон та способом отримання: синтепласт – термоскріплений синтепон з додаванням силікону; холофайбер – із трубчастих (за деякими джерелами хвилястих) волокон; синтетичний ватин – з додаванням натуральної бавовни; вовнопон – з додаванням натуральної вовни.

Найбільш масові галузі застосування НМОС: будівництво – для теплоізоляції приміщень; виробництво меблів – для підповерхневого шару оббивки м'яких меблів; легка промисловість – для утеплення одягу, ковдр, набивання подушок.

Переваги НМОС, які визначили його призначення: високі міцність волокна та еластичність (гнучкість і здатність до повільних зворотних

деформацій); низькі густина і теплопровідність; низька гігроскопічність; біологічна стійкість; безпечність для людей і тварин.

Аналіз викладеного показав, що з усієї номенклатури НМОС для виготовлення композиційного матеріалу для прокладного шару БМП непридатними є: синтепласт та голкопробивний синтепон – через утрудненість їх рівномірного заповнення мінеральним в'язучим і заповнювачем; синтетичний ватин та вовнопон – через очевидну недостатню біостійкість для терміну експлуатації десятки років; холофайбер – через очевидну меншу міцність трубчастих волокон. Придатним можна вважати звичайний термоскріплений або клейовий синтепон, хоча необхідно враховувати (дослідити), що клеї можуть впливати на твердіння мінеральної в'язучої речовини, а сплавлення волокон – зменшувати їх переріз, а, отже міцність.

Результати аналізу в'язучих речовин і волокнистих матеріалів, придатних для створення композиційного матеріалу для прокладного шару, опубліковані у [81, 82].

1.5 Робоча гіпотеза досліджень

За результатами аналітичного огляду літературних джерел висунуто робочу гіпотезу: отримати прокладний шар між безбаластним мостовим полотном і балками мосту, який швидко набуває потрібні фізико-механічні властивості та має довговічність 30 років, дозволить застосування для нього дисперсно-армованого композиційного матеріалу на основі цементу, фізико-механічні властивості якого забезпечуються електрогетерогенними контактами між поверхнями волокон і продуктів гідратації цементів.

Висновки до розділу 1

1. Виконано аналіз конструкції, технології улаштування і особливостей експлуатації прокладного шару між безбаластним мостовим полотном із залізобетонних плит і подовжніми балками залізничних металевих мостів. Встановлено, що зручний для укладання і сприятливий за фізико-механічними характеристиками гумодерев'яний прокладний шар, який традиційно застосовується для сполучення плит БМП з металевими балками має недостатню довговічність через гниття деревини.

2. В результаті аналізу напружено-деформованого стану залізобетонної плити безбаластного мостового полотна та з урахуванням технології укладання полотна встановлено, що міцність матеріалу прокладного шару між плитами і балками мосту через 6–8 годин після укладання має бути не меншою 1 МПа, у віці 2 доби та більше – не меншою 5 МПа, модуль деформації має бути не більшим ніж 10000 МПа. Цим умовам відповідають швидкотверднучі дисперсно-армовані композиції на основі мінеральних в'язучих речовини.

3. Виконано аналіз мінеральних в'язучих і волокон для дисперсного армування на предмет створення композиційного матеріалу для прокладного шару, позбавленого недоліків гумодерев'яного прокладного шару. Показано, що для такого композиційного матеріалу придатними є портландцемент з добавками прискорювачами твердіння, глиноземистий цемент, нетканий матеріал об'ємної структури із поліефірних волокон.

4. За результатами аналітичного огляду літературних джерел висунуто робочу гіпотезу.

РОЗДІЛ 2

ВИБІР МАТЕРІАЛІВ ТА РОЗРОБКА МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Вибір швидкотверднучого цементу для створення композиту

Виконано пошук (за даними веб-сайтів виробників) та аналіз наявних на ринку України кальцієво-алюмінатних цементів, придатних для створення композиційного матеріалу для прокладного шару. Результати аналізу зведені у табл. 2.1. За даними табл. 2.1 побудовано кінетичні залежності міцності на стиск цементів різних виробників, наведені на рис. 2.1.

Із рис. 2.1 видно, що найбільшою швидкістю твердіння характеризується цемент Isidac 40 виробника Çimsa, Туреччина [53], міцність якого через 24 години сягає 70 МПа. Привабливим цей цемент робить також найменша ринкова вартість – 16 грн. за 1 кг. Проте він характеризується більшими порівняно з кальцієво-алюмінатними цementsами інших виробників термінами тужавлення: початком – 280 хв., закінченням – 4 год. 40 хв. Але тужавлення може бути прискорене наведеними у п.1.4.3 добавками.

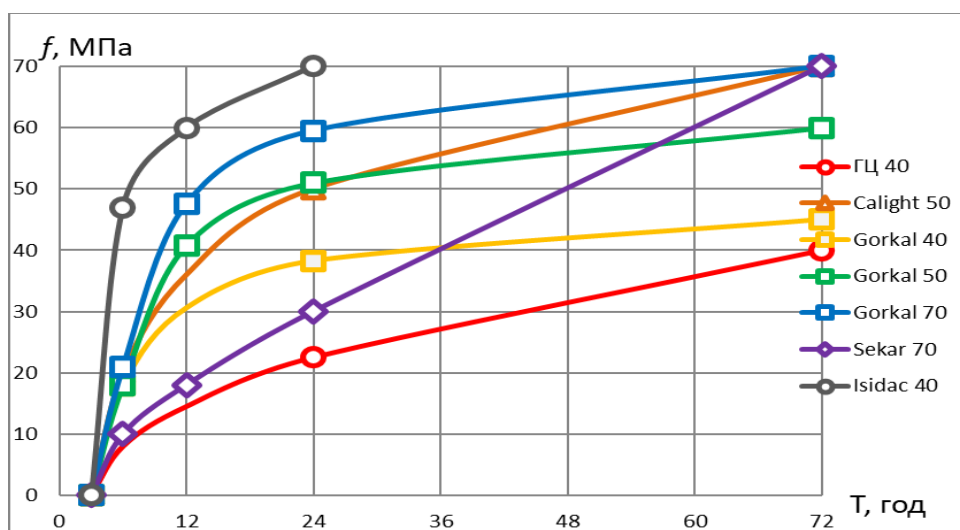


Рисунок 2.1 – Кінетика твердіння кальцієво-алюмінатних цементів за даними виробників

Таблиця 2.1 – Нормативні вимоги до кальцієво-алюмінатних цементів і характеристики цементів, присутніх на ринку України

Нормативні вимоги / Виробник	Технічні умови	Тип, марка	Строки тужавлення			Міцність на стиск f , МПа, у віці, годин					Вогнетривкість, С	Ціна за 1 кг, грн.	Можливі прискорювачі
			початок		кінець, год	3	6	12	24	72			
			хв	год									
Нормативні вимоги	ГОСТ 969-91 (скасований)	ГЦ 40	45	0,75	10				22,5	40	-		
		ГЦ 50	45	0,75	10				27,4	50	-		
		ГЦ 60	45	0,75	10				32,4	60	-		
		ВГЦ І 35	30	0,5	10					35	1580		
		ВГЦ ІІ 25	30	0,5	10					25	1670		
		ВГЦ ІІ 35	30	0,5	10					35	1670		
		ВГЦ ІІІ 25	30	0,5	10					25	1750		
	EN 14647:2005 ДСТУ Б EN 14647:2015	САС	90	1,50			18		40				
Україна	ГОСТ 969	ГЦ 40	45	0,75	10	0	8	14,5	22,5	40		22	
Cimsa, Туреччина	TS EN 14647	Isidac 40	280	4,67	4,9	0	47	60	70			16	ПЦ прискор./упов. на 5 хв. в залежності від співвідношення
Gorka Cement, Польща	EN 14647	Gorkal 40	90	1,50	8	0	18	30,6	38,3	45	1280	24	
		Gorkal 50	220	3,67	10	0	18	40,8	51	60	1460	27	
		Gorkal 70	160	2,67	4	0	21	47,6	59,5	70	1570	45	
Kerneos, Франція	EN 14647	Sekar 38R							40				
		Sekar 70	150	2,50	5,5	0	10	18	30	70	1700	40	Вапно, ПЦ, гіпс
		Ciment Fondu	180	3	8								
Caltra, Нідерланди	EN 14647	Calight 50	50	0,83	1,75	0	20	36	50	70		100	

Кальцієво-алюмінатний цемент Isidas 40 виробляється згідно турецькому стандарту TS 6271 4. Виробник надає такі характеристики цементу Isidas 40 [69].

Хімічний склад, визначений методом XRF: CaO – 37,05 %; Al_2O_3 – 40,4 %; SiO_2 – 2,05 %; Fe_2O_3 – 17,05 %; TiO_2 – 2,05 %; MgO – 0,8 %; Na_2O – 0 %; K_2O – 0,05 %; SO_3 – 0 %; втрати при прокалюванні (за EN 196-2) – 0,3 %.

Фізичні та фізико-механічні властивості за EN 196-3, EN 196-6:

- густина – 3300 кг/м³;
- питома поверхня – 4250 см²/г;
- нормальна густота тіста – 22,5 %;
- терміни тужавлення: початок – 175 хв, кінець – 220 хв;
- міцність на стиск: через 6 год. – 60 МПа; через 24 год. – 70 МПа; через 28 діб – 95 МПа;
- міцність на згин за EN 196-1, В/Ц = 0,4: через 6 год. – 6 МПа; через 24 год. – 8,5 Н/мм²; через 28 діб – 10 МПа.

Isidas 40 за 20 годин набуває 93 % міцності, впродовж 3 діб – решту 5 %. Цементний камінь порівняно з портландцементним більш щільний і менш пористий завдяки вдвічі більшій кількості хімічно зв'язуваної води.

Компанія Çimsa отримала кальцієво-алюмінатні цементи, марки яких відповідають міцності на стиск 65, 75, 100, 120 МПа.

Isidas 40 характеризується значним тепловиділенням, яке дозволяє застосовувати його в зимових умовах. Але розігрів понад +35°C не рекомендується для запобігання деструктивних процесів зі скидом міцності. Протягом всього періоду твердіння рекомендується змочування водою.

Isidas 40 характеризується високими термостійкістю, вогнетривкістю, жаростійкістю (до 1000 °C), морозостійкістю, сульфатостійкістю, стійкістю до морської води, стічних вод, слабокислих середовищ, газоподібних середовищ, зносостійкістю, можливістю регулювання термінів тужавлення.

Завдяки цим властивостям виробники рекомендують кальцієво-алюмінатні цементи:

- завдяки високій швидкості тужавлення – для зведення споруд, які потребують запуску в роботу в гранично короткі терміни, екстрених ремонтних робіт, попередження течій та проникнення води у гірництві, зміцнення та фіксації, заповнення зазорів між стіною і дверима чи вікнами тощо;

- завдяки високій корозійній стійкості – для конструкцій, що експлуатуються в умовах агресивних впливів, – інженерних споруд стічних систем та трубопроводів, каналізаційних систем, відстійників, анитикорозійних футерувань тощо;

- завдяки високим міцності та зносостійкості – для конструкцій, що зазнають значних механічних навантажень та впливів, – елементів доменних печей, мостових опор, хвилерізів, водоскидів гребель, ракетних шахт, злітно-посадкових смуг аеродромів, автомобільних доріг, наливних підлог, сходів, балок та перемичок тощо;

- завдяки високій жаростійкості – для елементів доменних печей, зведення промислових котлів, кладки печей та камінів тощо.

2.2 Вибір полімерного волокнистого матеріалу для армування композиту

Основна номенклатура типорозмірів НМОС, наявного на ринку, наведена у табл. 2.2 [80]. Стандартів на рівні національних на НМОС будь-якого призначення не виявлено, технічних умов у відкритому доступі також не виявлено.

Раціональною товщиною НМОС для композиційного матеріалу, за якої можливо забезпечити його рівномірне заповнення мінеральним в'язучим і заповнювачем, можна вважати 10–20, в середньому 15 мм (густину 100–200,

в середньому 150 г/м^2). Проте раціональна товщина НМОС має бути опрацьована у лабораторних умовах.

Таблиця 2.2 – Основна номенклатура НМОС, наявна на ринку

Густина, г/м^2	Товщина, мм	Довжина, м	Ширина, мм
80	5		
100	9-10	70	800; 1500; 2200
150	13-15	40	
200	18	30	
300	30	20	
400	40	15	

2.3 Матеріали для експериментальних досліджень

Для виготовлення зразків прокладного шару із рулонного композиційного матеріалу застосовано мінеральну суміш і НМОС із анізотрично орієнтованих поліефірних волокон товщиною 10 мм густиною 100 г/м^2 і 20 мм густиною 200 г/м^2 .

Матеріали для мінеральної суміші:

Портландцемент ПЦ І-500 Р-Н ДСТУ Б В.2.7-46:2010 (СЕМ І 42,5 R EN 197-1).

Цемент кальцієво-алюмінатий (глиноземистий) ДСТУ Б EN 14647:2015 Isidac 40 (TS EN 14647, Çimsa, Туреччина) [67, 69]:

- мінеральний склад, %: CaO – 36,2; Al_2O_3 – 39,8; SiO_2 – 3,6; Fe_2O_3 – 17,05; MgO – 0,65; SO_3 – 0,04; $\text{Na}_{2\text{екв}}$ – 0,16; Cl^- – 0,009; S – 0,01; в.п.п. – 0,34;
- істинна густина $\rho_{\text{п}}$ – 3250 кг/м^3 ;
- питома поверхня – $3000 \text{ см}^2/\text{г}$;
- залишки на ситах: 0,045 мм – 23%, 0,09 мм – 6,5 %;
- нормальна густина тіста – 0,231;
- В/Ц розчину – 0,45–0,55;

- міцність на стиск у віці: 6 годин – 47 МПа; 24 годин – 70 МПа.

Пісок ДСТУ Б В.2.7-32-95 Безлюдівського родовища:

- модуль крупності – 1,0–1,1 (дуже дрібний);

- істинна густина $\rho^п$ – 2620 кг/м³;

- насипна густина $\rho_n^п$ – 1450 кг/м³.

- пустотність – $\text{Пус}^п = 1 - \rho_n^п / \rho^п = 1 - 1450/2620 = 0,45$. (2.1)

Оптимальний коефіцієнт розсунення частинок піску:

$$\mu_{opt} = 2,1 \cdot (1 + d_{ц}/d_{п})^3 - 1,1 = 2,1 \cdot (1 + 0,02/0,23)^3 - 1,1 = 1,60, \quad (2.2)$$

де $d_{ц}$ – середній розмір частинки визначальної фракції цементу, 0,02 мм; $d_{п}$ – середній розмір частинки визначальної фракції піску, 0,23 мм.

Витрата піску на 1 м³ композиту:

$$\Pi = 1 / (\mu_{opt} \text{Пус}^п / \rho_n^п - 1 / \rho^п) = 1 / (1,60 \cdot 0,45 / 1450 + 1 / 2620) = 1145 \text{ кг} \quad (2.3)$$

Витрата цементу:

$$\text{Ц} = (1 - \Pi / \rho^п) / (1 / \rho^п + (В/\text{Ц}) / \rho^в) = (1 - 1145 / 2620) / (1 / 3250 + 0,43 / 1000) = 763 \text{ кг}, \quad (2.4)$$

де В/Ц – водоцементне відношення, прийнято 0,43; $\rho^в$ – густина води, 1000 кг/м³.

Склад суміші за масою:

$$\text{Ц} : \Pi = 763 : 1145 = 1 : 1,3. \quad (2.5)$$

Результати розрахунку наведені у табл. 2.3.

Таблиця 2.3 – Результати розрахунку складу мінеральної суміші на глиноземистому цементі для експериментальних досліджень

Показник	Позначення	Формула	Од. вимір.	Пісок П	Цемент Ц	Вода В
Середній розмір частинок визначальної фракції	d		мм	0,23	0,02	
Істинна густина	ρ		кг/м ³	2620	3250	1000
Насипна густина	ρ^H		кг/м ³	1450		
Пустотність	Пус	(2.1)		0,45		
Водоцементне відношення	В/Ц					0,43
Оптимальний коефіцієнт розсушення	μ_{opt}	(2.2)		1,60		
Витрата на 1 м ³	П, Ц	(2.3, 2.4)	кг	1145	763	328
Склад	Ц : П	(2.5)		1,50	1,0	

Для уточнення складу його варіювали під час експериментального дослідження. Для виготовлення експериментальних зразків композиту прийнято склади сумішей, наведені у табл. 2.4.

Таблиця 2.4 – Склади (співвідношення витрати компонентів за масою) мінеральної суміші для експериментальних зразків композиту

№	Ц	П
1	1	1
2	1	1,5
3	1	2

2.4 Оригінальна методика дослідження залежності деформативних властивостей композиту від його складу і технології улаштування

Під час експерименту варіювали склад мінеральної суміші та її витрату на одиницю об'єму НМОС. У складі мінеральної суміші масове відношення кількості піску до кількості цементу приймали 0; 1; 1,5; 2. Витрату мінеральної суміші на 1 м² НМОС товщиною 10 мм приймали 3,33; 6,67; 10 кг/м², що відповідає 333; 667; 1000 кг/м³, на 1 м² НМОС товщиною 20 мм

приймали 3,33; 6,67; 10; 15; 20 кг/м², що відповідає 167; 334; 500; 750; 1000 кг/м³.

Склади композиту для експериментальних досліджень наведені у табл. 2.5.

Компоненти суміші зважували, висипали у змішувач і ретельно перемішували впродовж не менше 3 хвилин. Із НМОС нарізали листи розміром 200×200 мм. Форму-рамку для приготування НМОС розміром 200×200 мм (рис. 2.2, *а*) встановлювали на віброплощадку та викладали поліетиленовою плівкою таким чином, щоб краї плівки висувались вище бортів форми (рис. 2.2, *а*). На дно форми укладали лист НМОС, вмикали віброплощадку і повільно та рівномірно насипали зверху попередньо зважену суху суміш (рис. 2.2, *б*). Вібрування продовжували, розрівнюючи суміш пензлем, до видимого припинення проникнення суміші вглиб НМОС. Плівку брали за краї, видаляли композицію із форми та загортали у плівку (рис. 2.2, *в*).

Виготовлення зразків прокладного шару здійснювали таким чином. У плівці, у яку загорнуто лист композиції розміром 200×200 мм, шилом проколювали отвори у шахматному порядку на відстані 30 мм один від одного. Лист композиції, загорнутий у плівку з отворами, занурювали у воду на 3 хвилини, після чого разом з плівкою нарізали на клаптики розміром 50×50 мм. З клаптиків видаляли плівку, пошарово укладали їх у матрицю прес-форми (рис. 2.3, *а*, *б*). Кількість шарів приймали такою, яка забезпечувала заповнення матриці доверху. Зразок притискали пуансоном, на який встановлювали штучний вантаж (рис. 2.3, *в*).

Сумарну масу пуансону та штучного вантажу приймали відповідною технологічному тиску, який створює плита БМП на прокладний шар під час укладання (табл. 2.6):

Таблиця 2.5 – Склади композиту та витрата матеріалів для експериментальних досліджень

№ серії зраз- ків	Цемент	Товщи- на НМОС, мм	Склад суміші П:Ц		Витрата				Кількість пластин на серію із 9 зразків	Витрата на серію експери- менту, кг	
					г/см ²	на пластину 20×20 см, г		на об'єм НМОС, кг/м ³		Ц	П
					суміші		Ц	П			
1	ПЦ І-500 Р-Н	10	0	1	0,33	132	132	0	333	5,36	4,24
2			0	1	0,67	268	268	0	667		
3			0	1	1	400	400	0	1000		
4			1	1	0,33	132	66	66	333		
5			1	1	0,67	268	134	134	667		
6			1	1	1	400	200	200	1000		
7			1,5	1	0,33	132	53	79	333		
8			1,5	1	0,67	268	107	161	667		
9			1,5	1	1	400	160	240	1000		
10			2	1	0,33	132	44	88	333		
11			2	1	0,67	268	89	179	667		
12			2	1	1	400	133	267	1000		
13	ПЦ І-500 Р-Н	20	0	1	0,33	132	132	0	167	17,6	9,8
14			0	1	0,67	268	268	0	334		
15			0	1	1	400	400	0	500		
16			0	1	1,5	600	600	0	750		
17			0	1	2	800	800	0	1000		
18			1	1	0,33	132	66	66	167		
19			1	1	0,67	268	134	134	334		
20			1	1	1	400	200	200	500		
21			1	1	1,5	600	300	300	750		
22			1	1	2	800	400	400	1000		
23			1,5	1	0,33	132	53	79	167		
24			1,5	1	0,67	268	107	161	334		
25			1,5	1	1	400	160	240	500		
26			1,5	1	1,5	600	240	360	750		
27			1,5	1	2	800	320	480	1000		
28			2	1	0,33	132	44	88	167		
29			2	1	0,67	268	89	179	334		
30			2	1	1	400	133	267	500		
31			2	1	1,5	600	200	400	750		
32			2	1	2	800	267	533	1000		
33	Isidac 40	20	0	1	0,5	200	200	0	250	7,2	5,2
34			0	1	1	400	400	0	500		
35			0	1	1,5	600	600	0	750		
36			1	1	0,5	200	133	67	250		
37			1	1	1	400	267	133	500		
38			1	1	1,5	600	400	200	750		
39			1,5	1	0,5	200	100	100	250		
40			1,5	1	1	400	200	200	500		
41			1,5	1	1,5	600	300	300	750		
42			0	1	2	800	800	0	1000		
43			0,5	1	2	800	533	267	1000	3,5	1,3
44			1	1	2	800	400	400	1000		

$$p = m/(nlb) = 2500/(2 \cdot 189 \cdot 20) = 0,33 \text{ кг/см}^2, \quad (2.6)$$

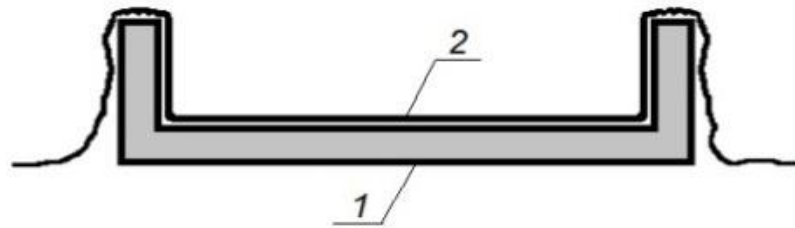
де m – маса плити БМП, 2500 кг;

n – кількість подовжніх балок, 2;

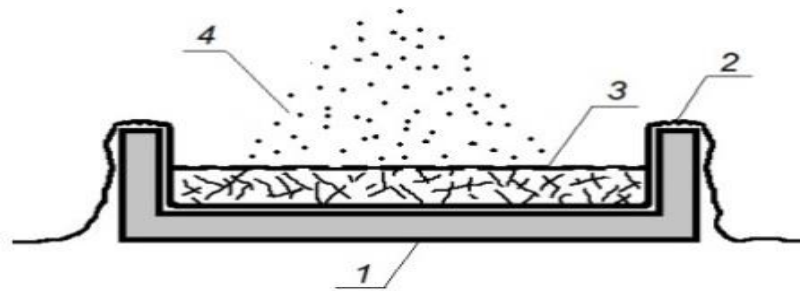
l – довжина плити, 189 см;

b – ширина прокладного шару (балки), 20 см.

а)



б)



в)

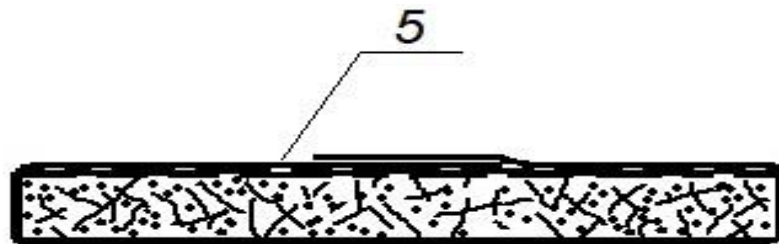


Рисунок 2.2 – Виготовлення зразків композиції
для експериментальних досліджень:

a – вкладання у форму поліетиленової плівки; $б$ – укладання у форму листа НМОС і засипання мінеральною сумішшю; $в$ – виділення композиції із форми і загортання у плівку; 1 – форма; 2 – поліетиленова плівка; 3 – НМОС; 4 – мінеральна суміш; 5 – готовий зразок

Таблиця 2.6 – Масогабаритні характеристики плит БМП [6] та розрахунок їхнього технологічного тиску на прокладний шар під час укладання

Марка плити	Довжина плити L , см	Маса плити M , кг	Погонна маса плити m , кг/м	Ширина прокладного шару b , см	Кількість балок n	Технологічний тиск на прокладний шар $p = m/(nlb)$, кг/см ²
П1	139	1800	1295,0	20	2	0,324
П2	149	1900	1275,2	20	2	0,319
П3	189	2500	1322,8	20	2	0,331
П4	199	2600	1306,5	20	2	0,327
					min	0,319
					max	0,331
					mid	0,325

Отже, сумарна маса пуансону та штучного вантажу складала $5 \cdot 5 \cdot 0,33 = 8,25$ кг, час витримки під тиском – 3 хвилини. Після витримування зразка під тиском матрицю перегортали і витискали зразок за допомогою виштовхувального кільця (З рис. 2.3, а). За допомогою електронного штангенциркуля вимірювали висоту зразка h_i визначали ступінь його стиснення:

$$K_{\text{ст}} = h/h_0, \quad (2.7)$$

де h_0 – первинна висота зразка (матриці).

Кожного складу композиції виготовляли по 9 зразків. Відформовані зразки поміщували у контейнери (рис. 2.4, а), між зразками прокладали водонасичену тканину, щільно закривали і витримували за температури $20 \pm 3^\circ\text{C}$. Через 24 год. і 28 діб твердіння випробували по 3 зразки з визначенням маси, розмірів, середньої густини ρ , початкового модуля пружності (модуля деформації) E та міцності на стиск f .

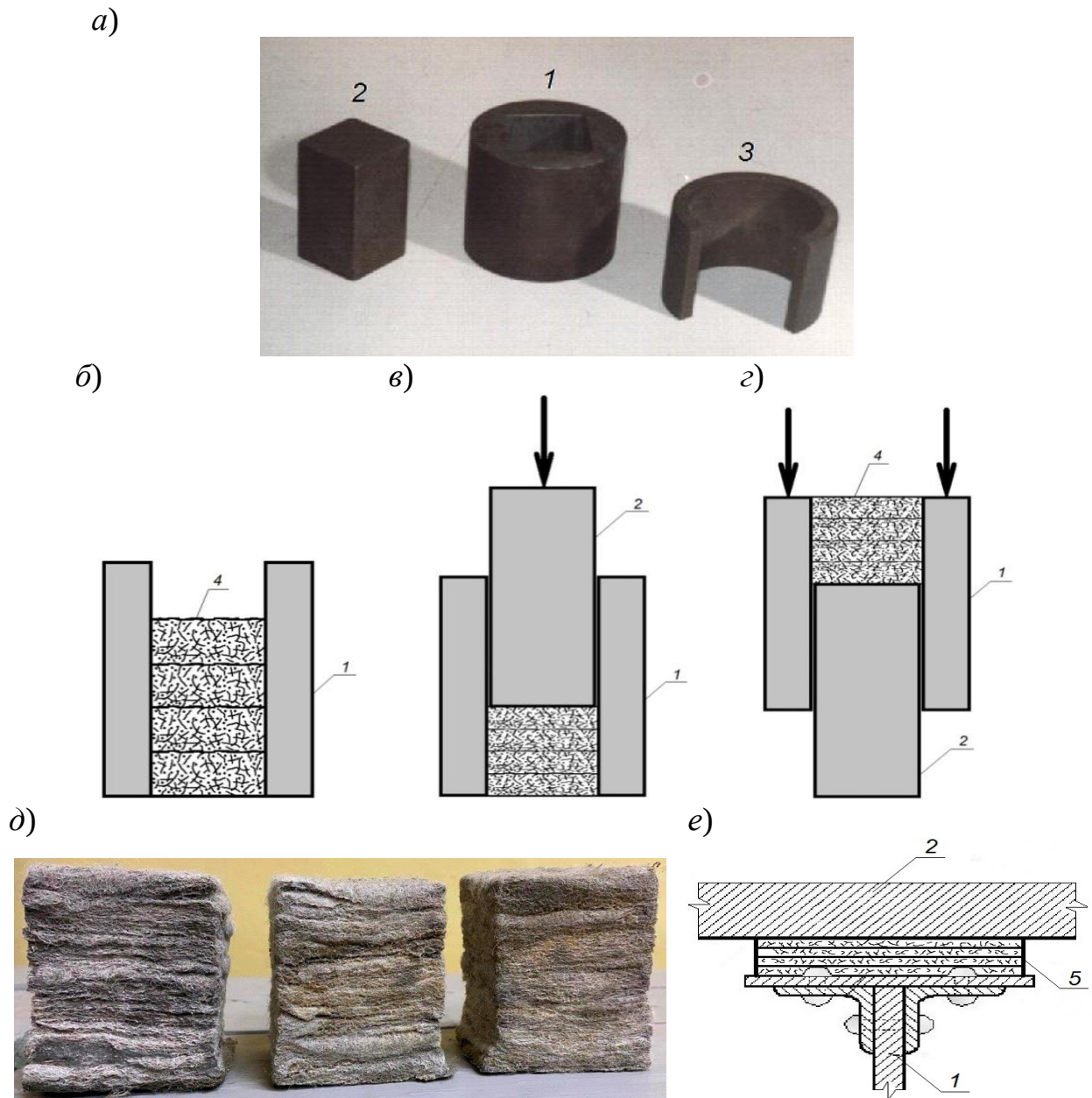


Рисунок 2.3 – Формування зразків прокладного шару для випробувань:

а – прес-форма; *б* – пошарове укладання композиту в матрицю прес-форми; *в* – ущільнення зразка пуансоном; *г* – витиснення зразка із матриці пуансоном за допомогою виштовхного кільця;

1 – матриця; 2 – пуансон; 3 – виштовхне кільце; 4 – зразок;

д – затверділі зразки, подібні прокладному шару (*е*): 1 – сталева мостова балка; 2 – залізобетонна плита;

5 – шари композиційного матеріалу

Готові для випробувань зразки наведені на рис. 2.4, б. Програма випробування зразків узагальнена у табл. 2.7.

а)



б)



Рисунок 2.4 – Зразки композиційного матеріалу: а – поміщені в контейнер для твердіння; б – готові для випробувань

Таблиця 2.7 – Програма випробування зразків композиту

Характеристики	Термін твердіння зразків			
	на ПЦ		на ГЦ	
	24 год	28 діб	24 год	28 діб*
Маса m , г, розміри $a \times b \times h$, мм, середня густина ρ , кг/м ³	+	+	+	+
Водопоглинання за масою W_m , %		+		+
Діаграма деформація ε – напруження σ , $\varepsilon = f(\sigma)$, модуль деформації E , МПа, міцність на стиск f , МПа	+	+	+	+

Для визначення E та f зразки стискали на гідравлічному пресі ступенями, вимірюючи відстань між плитами пресу у чотирьох точках (рис. 2.5), за результатами вимірювань трьох зразків будували діаграми деформування на стиск (графіки залежності між напруженням σ та відносною деформацією ε) у форматах $\varepsilon = f(\sigma)$ та $\sigma = f(\varepsilon)$.

Модуль деформації (початковий модуль пружності) визначали за діаграмами руйнування на початковій ділянці діаграми деформування як тангенс їх кута нахилу $E = \sigma/\varepsilon$ в точці, що відповідає фактичному напруженні в прокладному шарі близько МПа (рис. 1.5, в, з). Міцність на стиск f у разі відсутності видимого руйнування приймали умовно як напруження σ у точці переламу (найбільшої кривизни) діаграми при її переході до площадки текучості. У віці 28 діб визначали також водопоглинання за масою W_m .

2.5 Дослідження фізико-механічних властивостей композиції деревини та армованої гуми

Зразки композиції деревини та армованої гуми складали із дерев'яних кубів з розміром ребра 50 мм і квадратних пластин розміром 50×50 мм із транспортерної стрічки товщиною 10 мм (рис. 2.6). Отже, відношення товщини армованої гуми до деревини у прокладному шарі склало 1:5. Зразки стискали на гідравлічному пресі ступенями, вимірюючи відстань між плитами пресу. За результатами вимірювань трьох зразків будували діаграму деформування (графік залежності між напруженням та деформацією), за якою визначали модуль деформації E та міцність на стиск f гумодерев'яного прокладного шару.

а)



б)



в)



г)



Рисунок 2.5 – Випробування зразків:

- а – зразок на плиті гідравлічного преса перед початком випробування;
б – навантаження зразка; в – вимірювання відстані між плитами преса;
г – зразок після завершення випробування

а)



б)

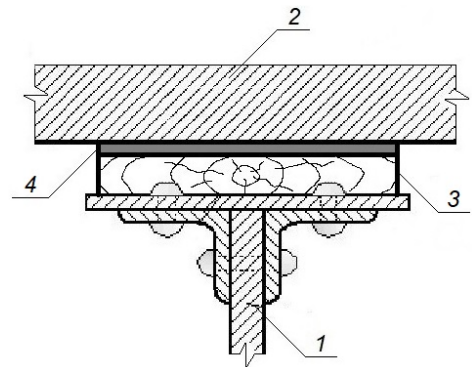


Рисунок 2.6 – Зразки композиції деревини та армованої гуми (а), подібні прокладному шару (б):

1 – сталева мостова балка; 2 – залізобетонна плита; 3 – дерев'яна дошка;
4 – армована гума

2.6 Дослідження гідрофізичних властивостей композиційного матеріалу

Дослідження гідрофізичних властивостей композиційного матеріалу полягало у визначення їх водопоглинання та морозостійкості.

Дослідження здійснювали на зразках, виготовлених згідно п. 2.5, у віці 28 діб.

Водопоглинання за масою визначали шляхом висушування зразка до постійної маси m_0 , потім водонасичення до постійної маси m_1 і розраховували за формулою:

$$W_m = 100(m_1 - m_0)/m_0, \% \quad (2.8)$$

Марку за морозостійкістю визначали за методикою, розробленою за аналогією з методикою, передбаченою для азбестоцементних виробів [66].

Порядок визначення марки за морозостійкістю:

Зразки поміщують у ємність з водою таким чином, щоб її рівень був на 10 мм вищий їх верхньої грані, водонасичують до постійної маси, зважують і піддають поперемінному заморожуванню і відтаванню. Послідовність кожного циклу заморожування й відтавання така: зразки поміщують у морозильну камеру і витримують за температури $-(18-20)^{\circ}\text{C}$ до повного замерзання (3 години). Після повного замерзання зразки видаляють з камери, поміщують у ємність з водою і витримують за температури $+20^{\circ}\text{C}$ до повного відтавання (3 години). Через 10, 25, 35, 50, 75, 100 циклів після відтавання зразки уважно оглядають, зважують з визначенням поточної маси m_i і розраховують втрату маси:

$$\Delta m = 100 \cdot (m_i - m_1) / m_1 \%. \quad (2.9)$$

Якщо на зразку не з'явилися видимі неозброєним оком пошкодження, а втрата маси не перевищила 2 %, вважають, що матеріал витримав поточну кількість циклів. За марку матеріалу з морозостійкості приймають останню кількість циклів із зазначеного вище переліку, яку матеріал витримав без видимих пошкоджень і втрати маси не більше 2 %.

2.7 Дослідження прискорення тужавлення цементів

Дослідження прискорення тужавлення портландцементу та глиноземистого цементу добавками здійснювали шляхом визначення строків тужавлення їх цементного тіста нормальної густоти за допомогою приладу Віка згідно [84] (рис. 2.7).

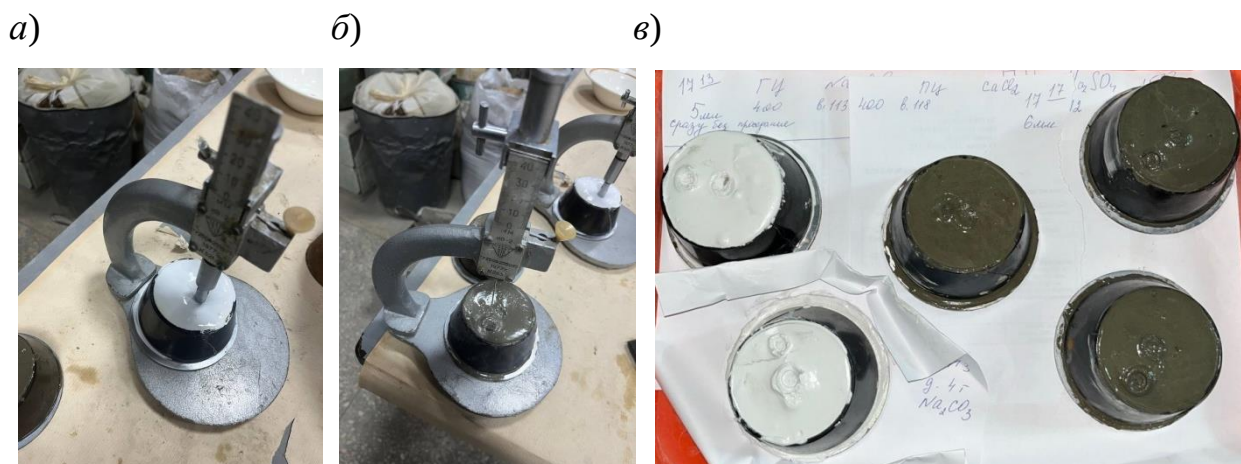


Рисунок 2.7 – Визначення нормальної густоти (а) і строків тужавлення (б) тіста портландцементу (б, в) і глиноземистого цементу (а, в) за допомогою приладу Віка

2.8 Фізико-хімічні дослідження композиційного матеріалу на основі цементів і поліефірного волокна

В будівельному матеріалознавстві для визначення продуктів гідратації в'язучих речовин традиційно застосовуються незалежні методи досліджень у складі, як правило, трьох, наприклад, рентгенофазового аналізу, інфрачервоної спектроскопії, термічний аналіз. На наш погляд для дослідження складу продуктів гідратації цементів на поліефірних волокнах ці методи є недостатньо інформативними. Разом з тим з'являються нові фізико-хімічні методи, наприклад, мікрорентгенівський аналіз, який для досліджень продуктів гідратації на поверхні волокон здається найбільш інформативним. Вважаємо, що для вивчення продуктів гідратації на поверхні волокон найбільш інформативним пакетом незалежних методів може бути світлова мікроскопія, скануюча електронна мікроскопія, рентгенівський мікроаналіз. Результати аналізу придатності нових методів досліджень опубліковані у [85, 86].

Фізико-хімічні дослідження продуктів гідратації цементів на поліефірних волокнах виконано у складі світлової мікроскопії, скануючої електронної мікроскопії, електронно-зондового мікроаналізу (мікрорентгенівського аналізу).

Світлову мікроскопію застосовували для дослідження мікроструктури композицій. Дослідження проводили за допомогою бінокулярного мікроскопа МБС-2 (рис. 2.8) у відбитому світлі на відколах композицій зі збільшенням $\times 7,5$; $\times 25$; $\times 50$; $\times 87,5$, яке дозволяє розрізняти структурні елементи розміром 1×10^{-6} – 1×10^{-8} м. Мікрознімки отримували зйомкою крізь окуляр мікроскопу цифровою камерою з роздільною здатністю 12 мегапікселей.



Рисунок 2.8 – Світловий мікроскоп МБС-2 зі зразками композиційного матеріалу із глиноземистого цементу і поліефірного волокна

Електронно-мікроскопічні дослідження морфології та електронно-зондовий мікроаналіз локального елементного складу затверділої композиції

виконували на її відколах за допомогою скануючого електронного мікроскопу JEOL JSM-6390LV (рис. 2.9) з енергодисперсійним спектрометром AZtechEnergy X-maxⁿ 50 (Японія).

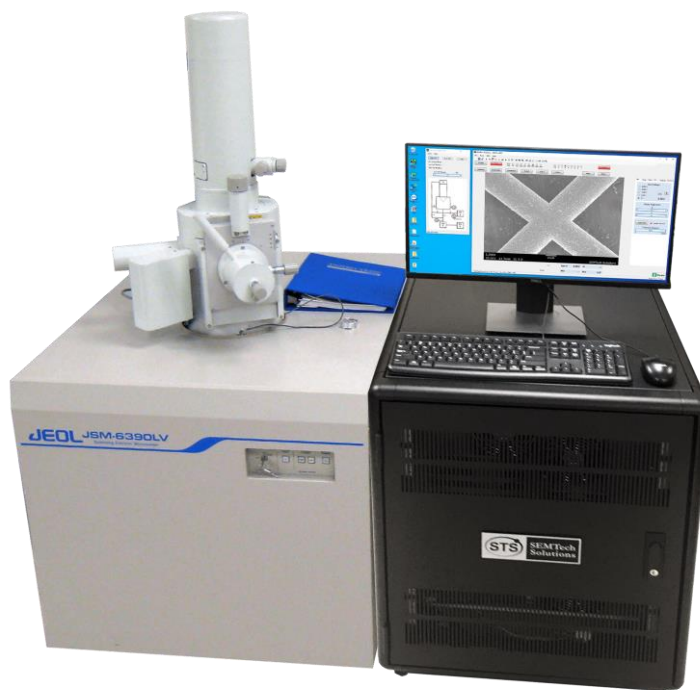


Рисунок 2.9 – Скануючий електронний мікроскоп
JEOL JSM-6390LV [87]

Зйомку з отриманням електронно-мікроскопічних знімків проводили за прискорюючої напруги 15 кВ в режимах збільшення від $\times 500$ до $\times 10000$.

У складі електронно-зондового мікроаналізу отримували рентгенівські карти хімічних елементів обраних фрагментів поверхні відколу, а за допомогою спеціалізованого ПО – кількісні показники вмісту хімічних елементів та оксидів на обраних локальних ділянках поверхні. На рентгенівських картах більш світлі області відповідають більшому вмісту елемента, більш темні – переважно його меншому вмісту (темні області можуть відповідати тіні від шорсткості відколу, яка заважає виходу сигналу). У складі електронно-зондового мікроаналізу отримували рентгенівські карти

хімічних елементів обраних фрагментів поверхні відколу, а за допомогою спеціалізованого ПО – кількісні показники вмісту хімічних елементів на обраних локальних ділянках поверхні. На рентгенівських картах більш світлі області відповідають більшому вмісту елемента, більш темні – переважно його меншому вмісту (темні області можуть відповідати тіні від шорсткості відколу, яка заважає виходу сигналу). За результатами мікрозондового аналізу вміст елементів перераховували з врахуванням стехіометричних коефіцієнтів і молекулярних мас у вміст відповідних оксидів, за яким робили висновки про склад продуктів гідратації.

Висновки до розділу 2

1. Для розробки композиційного матеріалу для прокладного шару обрано як в'язучі речовини портландцемент, швидкотверднучий глиноземистий цемент Isidas 40 виробництва Çimsa, Туреччин, а як дисперсне армування – нетканий матеріал об'ємної структури із поліефірних волокон.

2. Розроблено оригінальні методики дослідження: фізико-механічних властивостей композиційного матеріалу та композиції деревини та армованої гуми; залежності деформативних властивостей композиційного матеріалу від його складу і технології улаштування; гідрофізичних властивостей композиційного матеріалу; прискорення тужавлення цементів; фізико-хімічних досліджень композиційного матеріалу на основі цементів і поліефірного волокна.

РОЗДІЛ 3

ТЕОРЕТИЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ СКЛАДУ КОМПОЗИЦІЙНОГО МАТЕРІАЛУ ІЗ ЦЕМЕНТУ ТА ПОЛІЕФІРНОГО ВОЛОКНА ДЛЯ ПРОКЛАДНОГО ШАРУ

3.1 Аналіз здатності волокна до взаємодії з продуктами гідратації цементів

Виконано аналіз хімічного складу, структури, властивостей поліефірних волокон у зв'язку з їх взаємодією з цементною матрицею [88–92]. Фізико-механічні властивості композиційних матеріалів із цементів і волокон залежать від взаємодії і зчеплення між частинками продуктів гідратації цементів між собою і поверхнею волокон [61, 93]. Ця взаємодія реалізується за рахунок електростатичних взаємодій між частинками (волокнами). Продукти гідратації цементів у водному середовищі набувають електричний поверхневий заряд. На поверхні полімерних волокон можуть міститись полярні функціональні групи, що також є електричними зарядами [94]. Зчеплення забезпечують електрогетерогенні контакти між різнойменними електричними зарядами на поверхнях частинок (волокон), що взаємодіють [95, 96]. У разі гідрофобної поверхні волокон, на якій полярні функціональні групи відсутні, такі контакти не виникають і зчеплення не відбувається [94].

Молекулярна структура поліетилентерефталату ПЕТ ($C_{10}H_8O_4$)_n, із якого складаються поліефірні волокна, наведена на рис. 3.1 [89–92].

Виходячи з молекулярної структури (рис. 3.1) переважаючими функціональними групами ПЕТ є естерні групи ($-COO-$) та ароматичні кільця ($-C_6H_4-$). Ці групи є неполярними і забезпечують гідрофобність, хімічну інертність та стабільність полімеру. В присутності води та за підвищеної температури естерні групи можуть гідролізуватись з утворенням гідроксильних груп OH .

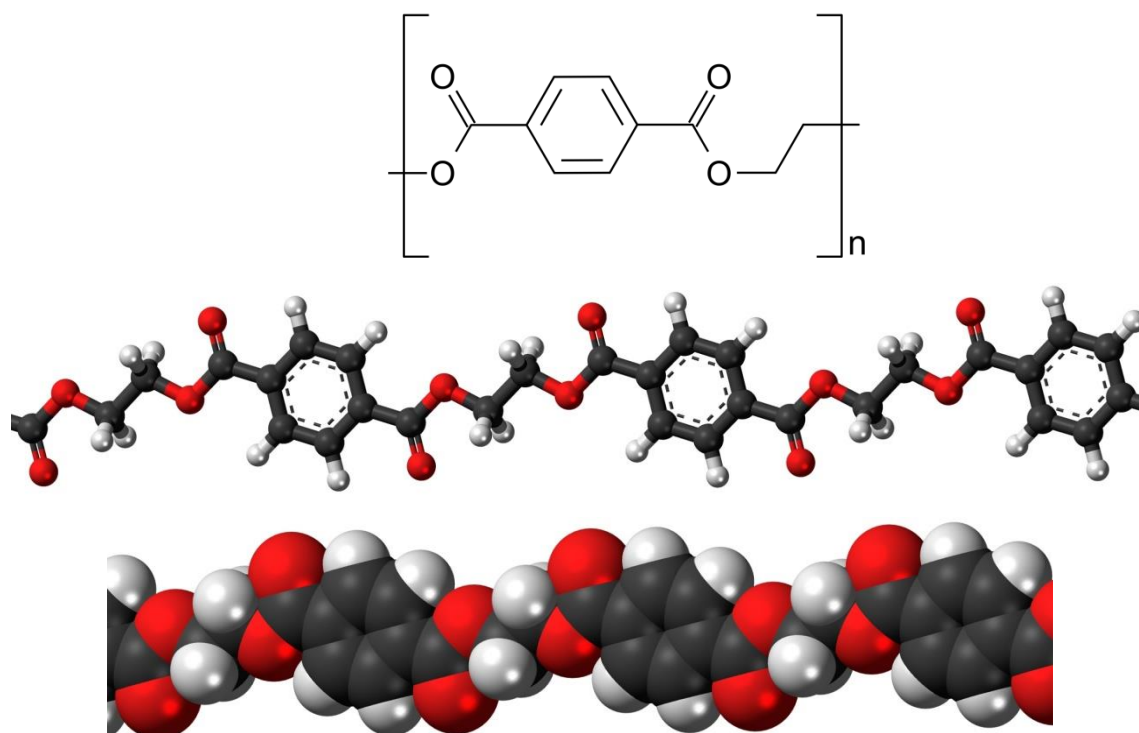
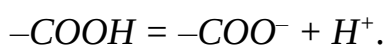


Рисунок 3.1 – Молекулярна структура поліетилентерефталату.

Атоми вуглецю C – чорні, кисню O – червоні, водню H – білі

Виходячи із реакцій синтезу ПЕТ (п. 1.4.3) на кінцях полімерних ланцюгів можуть залишатись гідроксильні групи $-OH$, що утворились під час поліконденсації етиленгліколю, а також карбоксильні групи $-COOH$, що залишилися від терефталевої кислоти. Карбоксильна група у лужному водному середовищі цементів дисоціює:

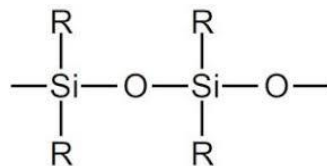


Отже, на поверхні волокон у водному середовищі тверднучих цементних паст утворюється певна кількість функціональних груп $-OH$, і $-COO^-$, отже негативно заряджених активних поверхневих центрів.

Їх кількість може бути збільшена модифікацією поверхні – окисненням, гідролізом (розщепленням певної кількості естерних зв'язків), нанесенням покриттів із аніонних ПАР (згідно правила вирівнювання полярностей).

На поверхні волокон також містяться змащувачі тощо: силікони, поліетиленгліколь (п. 1.4.3) [88, 89].

Загальна формула силіконів (полісилоксанів) [90] – $[R_2SiO]_n$, де R – органічна функціональна група:



Основні функціональні групи в більшості силіконів – метильна $-CH_3$, етильна $-C_2H_5$, фенільна $-C_6H_5$ мають певний дипольний момент відносно кремнійкисневого ланцюга. Але цей момент незначний і порівняно з групами, що здатні дисоціювати з утворенням іонів, наприклад, $-OH^-$, $-COO^-$ мають набагато менший вплив на електричний характер поверхні волокна.

В низькомолекулярних силіконах або силіконових оліях, у яких полімер не до кінця конденсований, на кінцях полімерних ланцюгів або на поверхні силікону наявні гідроксильні групи $-OH^-$. Саме такі силікони використовуються для змащення поліефірних волокон.

Крім того, силікони, отримані за різними технологіями та різного призначення можуть містити: карбоксильні групи ($-COOH$); аміногрупи ($-NH_2$); алкоксигрупи ($-OR$); вінільні групи ($-CH=CH_2$); епоксигрупи ($-CH_2-O-CH-$).

Із зазначених груп гідроксильні групи $-OH^-$, карбоксильні групи $-COOH$, аміногрупи $-NH_2$ є полярними і надають волокнам гідрофільності.

Поліетиленгліколь є водорозчинним полімером, неіоногенною ПАР з молекулярною структурою $HOCH_2-(CH_2CH_2O)_n-CH_2OH$ [63]. Нанесений як покриття на поліефірні волокна за рахунок гідроксильних груп $-OH^-$ він також надає їм гідрофільних властивостей.

Таким чином на поверхні поліефірних волокон, у т.ч. з покриттям із силіконів, поліетиленгліколю у водному середовищі тверднучих цементних паст утворюється певна кількість функціональних груп $-OH^-$, $-COO^-$, отже негативно заряджених активних поверхневих центрів, які здатні утворювати

електрогетерогенні контакти з частинками продуктів гідратації цементів, що мають позитивний поверхневий заряд.

3.2 Аналіз електроповерхневих властивостей продуктів гідратації портландцементу та глиноземистого цементу

Здатність частинок продуктів гідратації цементів утворювати між собою, а також з поверхнями волокон і заповнювачів міцні електрогетерогенні контакти залежить від їх поверхневих зарядів і електроповерхневих потенціалів [95-97].

Основним продуктами гідратації портландцементу є гідросилікати кальцію CSH (гідросилікатний гель), гідроксид кальцію $Ca(OH)_2$ (CH , кристалогідрати портландиту), гідросульфоалюмінати та гідроалюмінати кальцію. Їх електроповерхневі властивості згідно з [95] наведені у табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Електроповерхневі потенціали структурних складових портландцементу та композиційних матеріалів на їх основі

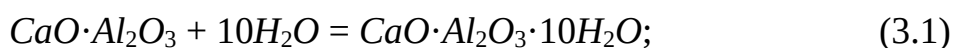
№	Сполука		Електроповерхневий потенціал, В	
	Найменування і позначення	Стехіометрична формула	ψ^0	$\psi^p (pH=12)$
1	Аліт C_3S	$3CaO \cdot SiO_2$	0,74	-0,03
2	Беліт C_2S	$2CaO \cdot SiO_2$	0,55	-0,16
3	Трикальцієвий алюмінат C_3A	$3CaO \cdot Al_2O_3$	0,90	0,20
4	Портландит CH	$Ca(OH)_2$	1,24	0,53
5	Високоосновні гідросилікати кальцію	C_2SH	0,59	-0,11
6	Низькоосновні гідросилікати кальцію	CSH	0,29	-0,37
7	Етригніт $C_3A \cdot 3CaSO_4 \cdot H_{32}$	$C_3A \cdot 3CaSO_4 \cdot H_{32}$	0,90	0,19
8	Кварц	SiO_2	-0,55	-1,26

Із табл. 3.1 видно, що в середовищі води замішування, а потім порового електроліту тверднучого портландцементу з $pH = 12$ гідросилікатний гель (гідросилікати кальцію C_2SH і CSH) характеризується негативним значенням рівноважного електроповерхневого потенціалу ψ^p , кристалогідрати

портландиту та гідросульфоалюмінатів кальцію – позитивними. Поверхня кварцу – дрібного заповнювача характеризується також негативним ψ^p . Отже, основними продуктами гідратації портландцементу, що утворюють між собою електрогетерогенні контакти та забезпечують набуття цементним каменем міцності, є кристалогідрати портландиту CH , що характеризується позитивним поверхневим зарядом і потенціалом, і гідросилікатний гель з негативним поверхневим зарядом і потенціалом. Аналогічні контакти з негативно зарядженими активними поверхневими центрами на поліефірному волокні утворюють кристали CH . З поверхнями заповнювача електрогетерогенні контакти утворює також CH .

Основні продукти гідратації глиноземистого цементу (п. 1.4.2) утворюються внаслідок реакцій гідратації:

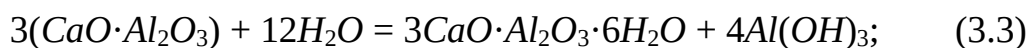
- CAH_{10} :



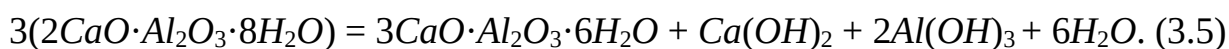
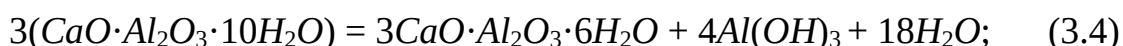
- C_2AH_8 :



- C_3AH_6 (гідрогарніт) за рахунок власної гідратації:



- C_3AH_6 за рахунок перекристалізації CAH_{10} і C_2AH_8 :



Як видно із цих реакцій, їх продуктами крім гідроалюмінатів кальцію є й гідроксид алюмінію $Al(OH)_3$ (реакції 3.2, 3.3, 3.4, 3.5) і навіть гідроксид кальцію $Ca(OH)_2$ (реакція 3.5).

Проаналізуємо поверхневі заряди та електроповерхневі потенціали клінкерних мінералів, продуктів їх гідратації, заповнювачів в середовищі штучного каменю глиноземистого цементу. Ці властивості визначаються структурою подвійного електричного шару на границі розподілу твердої

фази (кристалів та селевих частинок продуктів гідратації) та рідкої фази (води замішування, а згодом порового електроліту) [61, 94] (рис. 3.2).

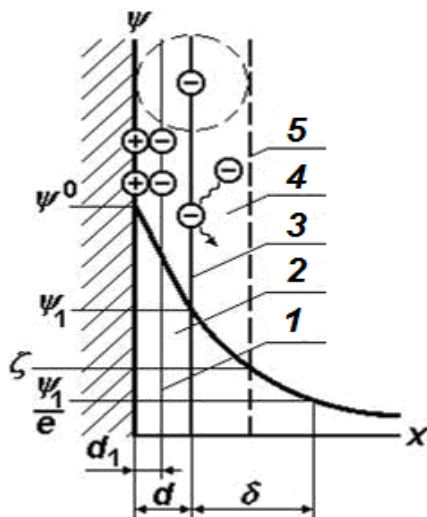


Рисунок 3.2 – Схема будови подвійного електричного шару на границі розподілу «неорганічна тверда дисперсна фаза – рідинне дисперсійне середовище (водний розчин)» і розподілу потенціалу в ньому [77]:

ψ^0 – електроповерхневий потенціал (абсолютний); ψ_1 – потенціал на границі щільної і дифузної частин ПЕШ (рівноважний);

ζ – електрокінетичний потенціал; δ – товщина дифузної частини

ПЕШ; 1 – внутрішня площина Гельмгольца; 2 – щільна частина

ПЕШ; 3 – зовнішня площина Гельмгольца; 4 – дифузна частина

ПЕШ; 5 – площина ковання

Основні рівняння, що визначають електроповерхневий потенціал частинок неорганічної дисперсної фази у водно-дисперсних системах в залежності від їх хімічного складу [60, 94]:

$$\psi_{xyz}^0 = -\frac{x\psi_x^0 + y\psi_y^0 + z\psi_z^0}{x+y+z}, \text{ В;} \quad (3.6)$$

$$\psi^p_{XYZ} = \psi^0_{XYZ} - 0,059pH, \text{ В}, \quad (3.7)$$

де ψ^0 – абсолютний електроповерхневий потенціал простої речовини (табл. 3.2);

ψ^0_{XYZ} – абсолютний електроповерхневий потенціал хімічної сполуки $X_xY_yZ_z$, де x, y, z – стехіометричні коефіцієнти елементів у сполуці;

$\psi^0_X, \psi^0_Y, \psi^0_Z$ – абсолютні електроповерхневі потенціали елементів X, Y, Z ;

ψ^p_{XYZ} – рівноважний електроповерхневий потенціал сполуки (близький до ψ_1).

Таблиця 3.2 – Абсолютні значення електроповерхневого потенціалу ψ^0 простих речовин [94]

Елемент		Електроповерхневий потенціал ψ^0 , В
Кальцій	<i>Ca</i>	–4,20
Водень	<i>H</i>	–1,20
Кремній	<i>Si</i>	–1,23
Алюміній	<i>Al</i>	–2,99
Кисень	<i>O</i>	1,44

Згідно з формулами (3.6) і (3.7) абсолютні та рівноважні (за $pH = 11,5$) значення електроповерхневих потенціалів дорівнюватимуть:

- моноалюмінату кальцію $CaO \cdot Al_2O_3$:

$$\psi^0_{CA} = - \frac{-4,2 + 1,44 + 2 \cdot (-2,99) + 3 \cdot 1,44}{1 + 1 + 2 + 3} = 0,631 \text{ В};$$

$$\psi^p = 0,631 - 0,059 \cdot 11,5 = -0,047, \text{ В},$$

- гідрогарніту $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 6H_2O$:

$$\psi^0_{C3AH6} = - \frac{3 \cdot (-4,2) + 3 \cdot 1,44 + 2 \cdot (-2,99) + 3 \cdot 1,44 + 6 \cdot 2 \cdot (-1,2) + 6 \cdot 1,44}{3 + 3 + 2 + 3 + 6 \cdot (2 + 1)} = 0,904 \text{ В};$$

$$\psi^p = 0,904 - 0,059 \cdot 11,5 = 0,225, \text{ В},$$

- гідроксиду алюмінію $Al(OH)_3$:

$$\psi_{АНЗ}^0 = -\frac{-2,99 + 3 \cdot 1,44 + 3 \cdot (-1,20)}{1 + 1 + 2 + 3} = 0,324 \text{ В};$$

$$\psi^p = 0,904 - 0,059 \cdot 11,5 = -0,354, \text{ В.}$$

Результати розрахунків електроповерхневих потенціалів для зазначених та інших клінкерних мінералів, продуктів гідратації та заповнювачів наведені у табл. 3.3.

Таблиця 3.3 – Електроповерхневі потенціали структурних складових мінеральних в'язучих та композиційних матеріалів на їх основі

№	Сполука		Електроповерхневий потенціал, В	
	Найменування і позначення	Стехіометрична формула		
			ψ^0	$\psi^p (pH=11,5)$
1	Моноалюмінат кальцію (CA)	$CaO \cdot Al_2O_3$	0,631	-0,047
2	П'ятикальцієвий три алюмінат (C_5A_3)	$5CaO \cdot 3Al_2O_3$	0,751	0,073
3	Діалюмінат кальцію (CA_2)	$CaO \cdot 2Al_2O_3$	0,507	-0,172
3	Десятиводний одонокальцієвий алюмінат (CAH_{10})	$CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 10H_2O$	0,631	-0,047
4	Вісьмиводний двокальцієвий алюмінат (C_2AH_8)	$2CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 8H_2O$	0,798	0,119
5	Гідрогарніт (C_3AH_6)	$3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 6H_2O$	0,904	0,225
6	Гідроксид алюмінію ($АНЗ$)	$Al(OH)_3$	0,324	-0,354
7	Портландит (CH_2)	$Ca(OH)_2$	0,744	0,066
8	Кварц	SiO_2	-0,550	-1,229

Із табл. 3.3 видно, що в середовищі води замішування, а потім порового електроліту тверднучого глиноземистого цементу з $pH = 11,5$ алюмінати кальцію характеризуються як негативними (CA і CA_2), так і позитивними (C_5A_3) значеннями рівноважного електроповерхневого потенціалу ψ^p . Гідроалюмінати кальцію характеризуються: CAH_{10} – незначним негативним значенням ψ^p , C_2AH_8 і C_3AH_6 – позитивними, причому гідрогарніт C_3AH_6 – значним з величиною 0,225 В. Позитивним ψ^p характеризується також гідроксид кальцію $Ca(OH)_2$. Гідроксид алюмінію $Al(OH)_3$ характеризується

значним за величиною негативним значенням $\psi^p = -0,354$ В. Поверхня кварцу – дрібного заповнювача характеризується також негативним ψ^p .

Таким чином основними продуктами гідратації глиноземистого цементу, що утворюють між собою електрогетерогенні контакти та забезпечують набуття цементним каменем міцності, є кристали гідрогарніту C_3AH_6 , що характеризується позитивним поверхневим зарядом і потенціалом, і гелеподібний гідроксид алюмінію – алюмогель $Al(OH)_3$ з негативним поверхневим зарядом і потенціалом. Аналогічні контакти з негативно зарядженими активними поверхневими центрами на поліефірному волокні утворюють кристали C_3AH_6 . З поверхнями заповнювача електрогетерогенні контакти утворює гідроксид алюмінію.

Кристалічна структура алюмінатів згідно з [54, 95] складається із октаедрів $Al(OH)_6$ (рис. 3.3, а), може містити аналогічні октаедри $Ca(OH)_6$. В центрі цих октаедрів розташовується атом Al (Ca), а у шести вершинах – гідратовані атоми кисню OH , які для суміжних октаедрів є спільними. Октаедри за рахунок спільних вершин в основному утворюють шари, як у портландиті (рис. 3.3, б) гідроксиді алюмінію (рис. 3.3, в), AFt -фазах (рис. 3.3, г), між якими можуть міститись катіони Ca^{2+} , аніони OH^- , молекули води H_2O , а у AFm - і AFt -фазах ще й аніони SO_4^{2-} , CO_3^{2-} , Cl^- . C_3AH_6 має кристалохімічну формулу $Ca_3Al_2(OH)_{12}$, за структурою аналогічна AFt -фазі, в якій між шарами октаедрів містяться аніони OH^- , а із октаедрів будуються кристали кубічної сингонії (рис. 3.3. д).

Виходячи із зазначеної кристалічної будови алюмінатних фаз та визначених вище їх рівноважних електроповерхневих потенціалів потенціалвизначальними іонами є: у алюмогелі $Al(OH)_3$ з негативним поверхневим зарядом – аніони OH^- , у кубічних кристалогідратів C_3AH_6 з позитивним поверхневим зарядом – катіони Ca^{2+} .

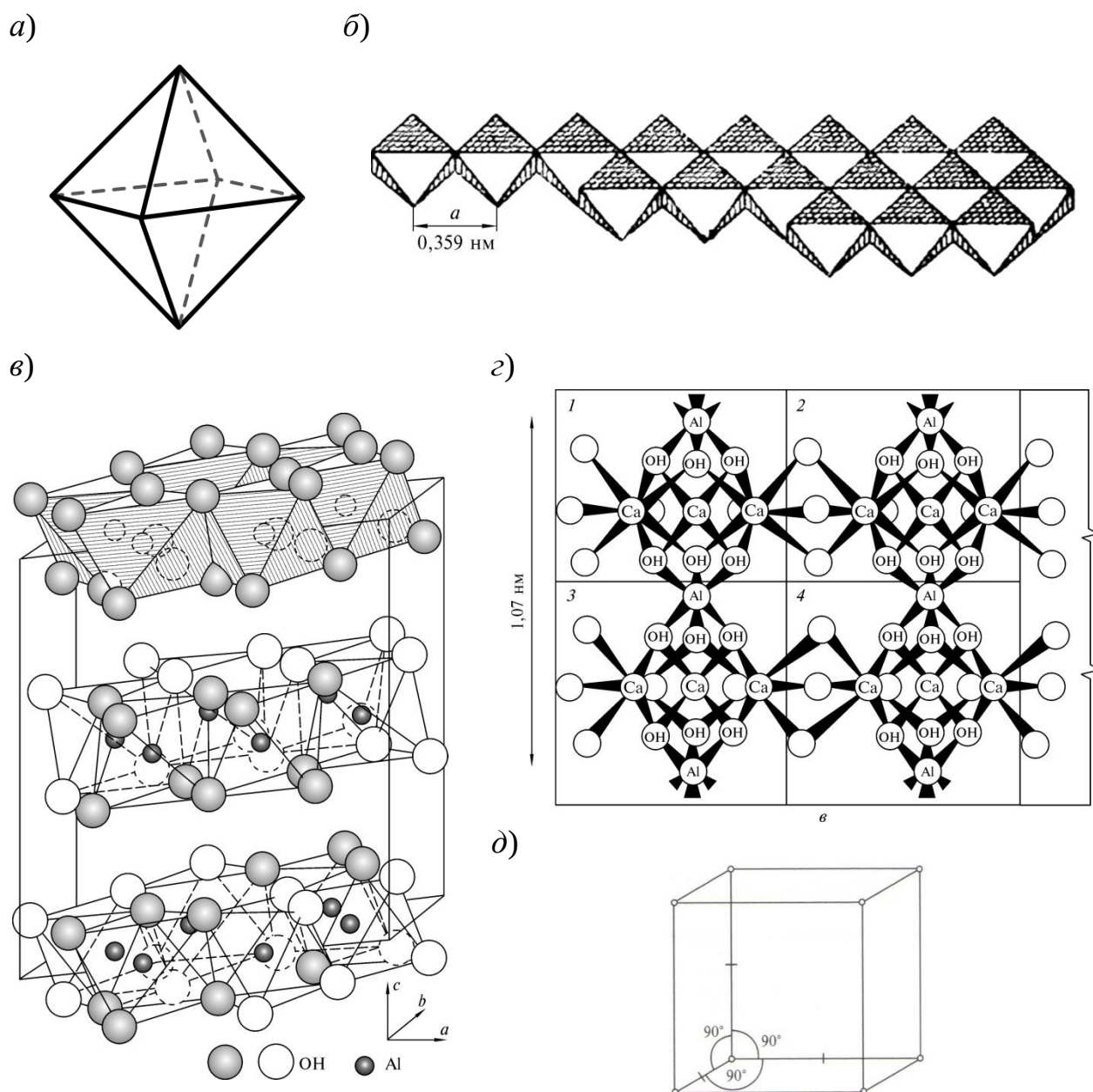


Рисунок 3.3 – Структура продуктів гідратації глиноземистого цементу:

а – кристалічна структура $Al(OH)_3$ (гідраргіліту);

в – структурні одиниці кристалів, побудованих із
октаедрів $Al(OH)_6$ і $Ca(OH)_6$ у т.ч. C_3AH_6 ;

б – кубічна сингонія кристалів C_3AH_6 .

3.3 Взаємодія продуктів гідратації портландцементу, глиноземистого цементу та поліефірного волокна

Виходячи із даних про активні функціональні групи на поверхні поліефірного волокна (п. 3.1) та поверхневі заряди, потенціали та активні поверхневі центри продуктів гідратації портландцементу та глиноземистого цементу (п. 3.3) між ними можуть утворюватись такі електрогетерогенні контакти:

- портландцементу:
 - між поверхнею волокна і кристалогідратами портландиту $Ca(OH)_2$ (рис. 3.4, а, б, в, 3.6, 3.7);
 - між кристалогідратами портландиту $Ca(OH)_2$ і частинками гідросилікатного гелю (рис. 3.4, г, д, е, 3.6, 3.7);
- глиноземистого цементу:
 - між поверхнею волокна і кристалогідратами C_3AH_6 (рис. 3.5, а, б, в, 3.8, 3.9);
 - між кристалогідратами C_3AH_6 і частинками алюмогелю (рис. 3.5, г, д, е, 3.8, 3.9).

Припущена структура композиційного матеріалу із портландцементу та поліефірних волокон, наведена на рис. 3.6, а і 3.7, а, підтверджується відповідністю електронно-мікроскопічним знімкам рис. 3.6, б, 3.6, в [61]. Аналогічно структура композиційного матеріалу із глиноземистого цементу та поліефірних волокон, наведена на рис. 3.8, а і 3.9, а, підтверджується відповідністю результатам електронно-мікроскопічного аналізу (п.4.1).

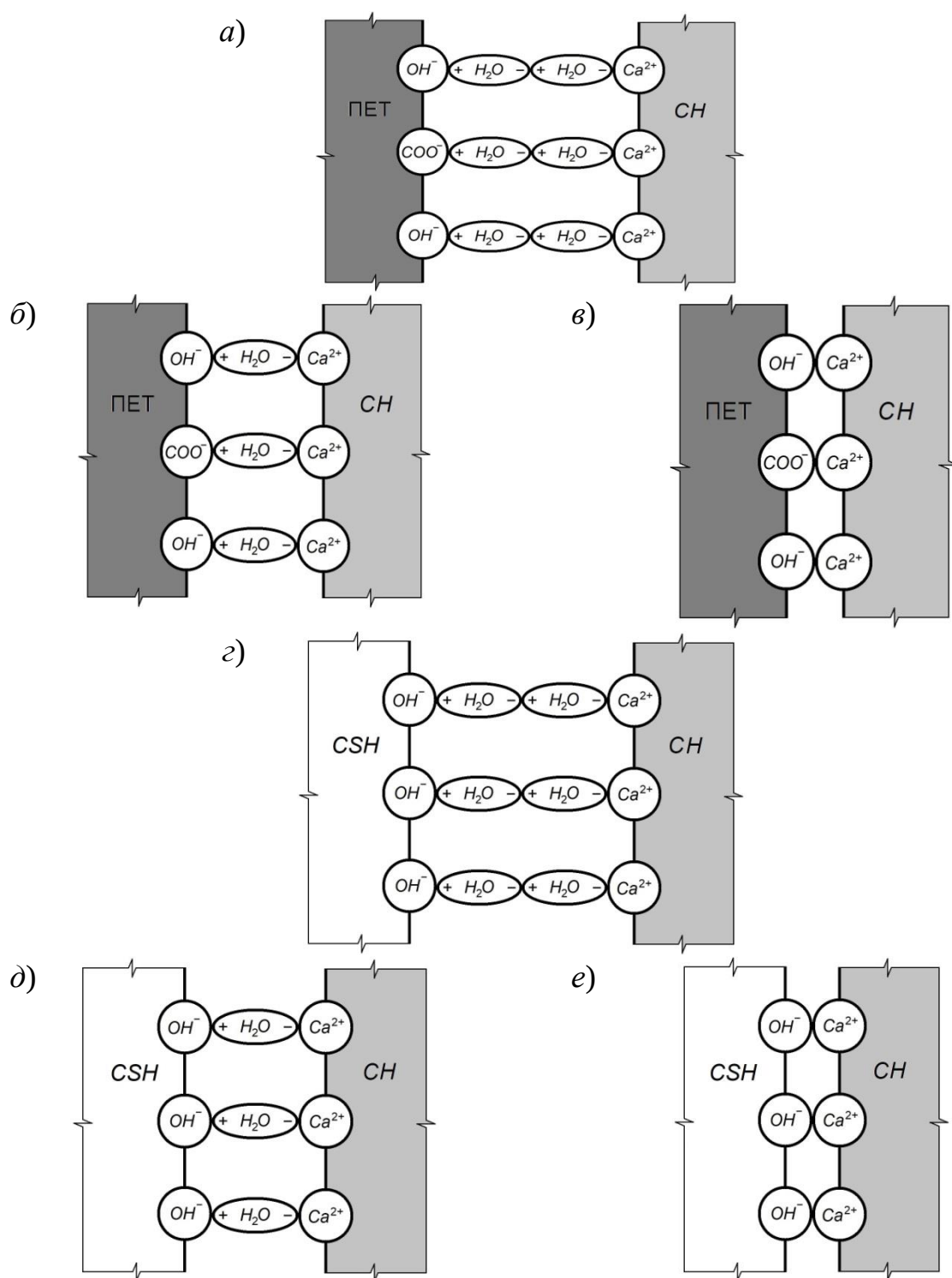


Рисунок 3.4 – Схеми електрогетерогенних контактів між поверхнями поліефірних волокон ПЕТ і $\text{CH} - \text{Ca}(\text{OH})_2$ (а, б, в), а також між CH і гідросилікатним гелем CSH : а, г – через полімолекулярні водні прошарки; б, д – через мономолекулярні водні прошарки; в, е – безпосередньо між потенціалвизначальними іонами

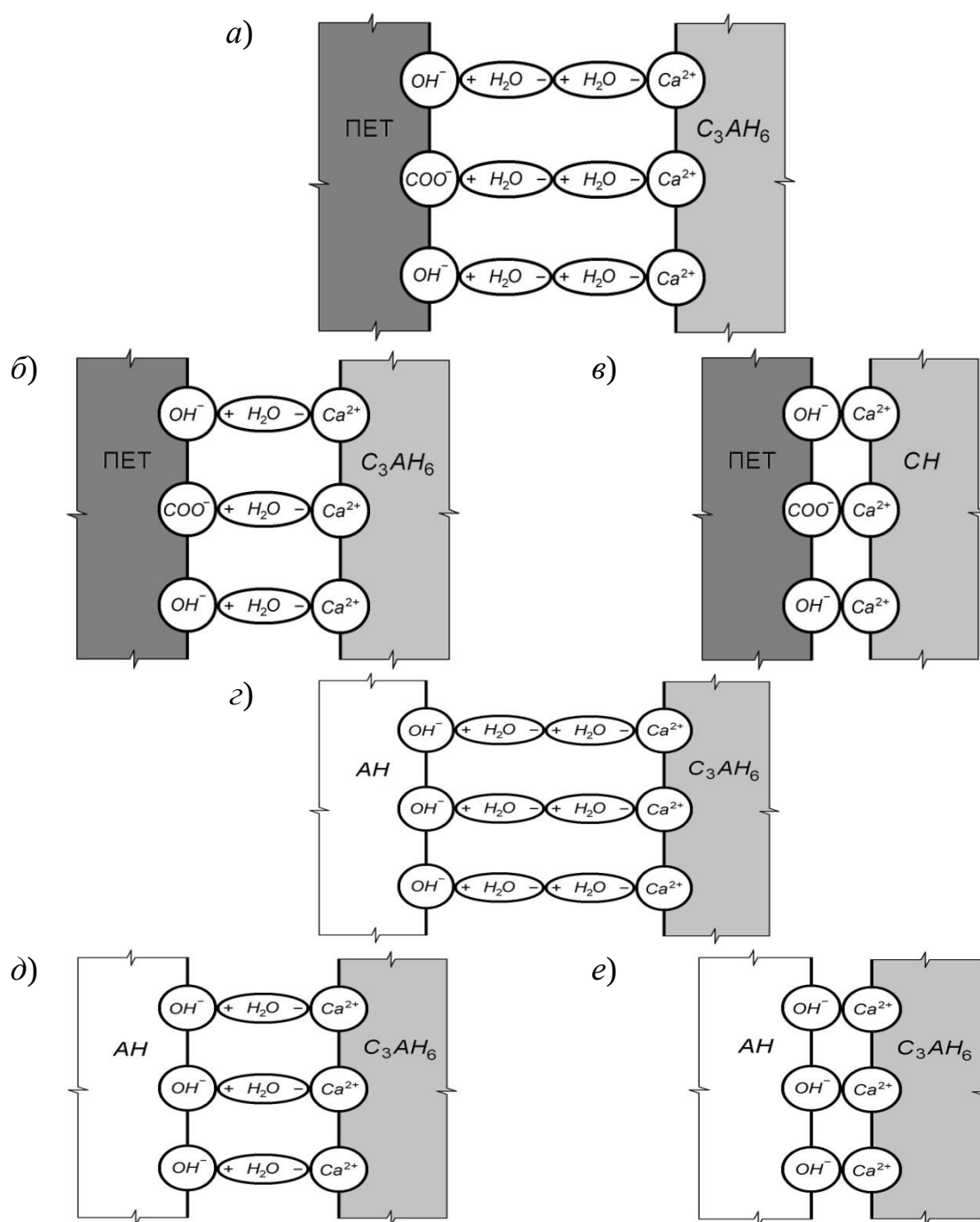
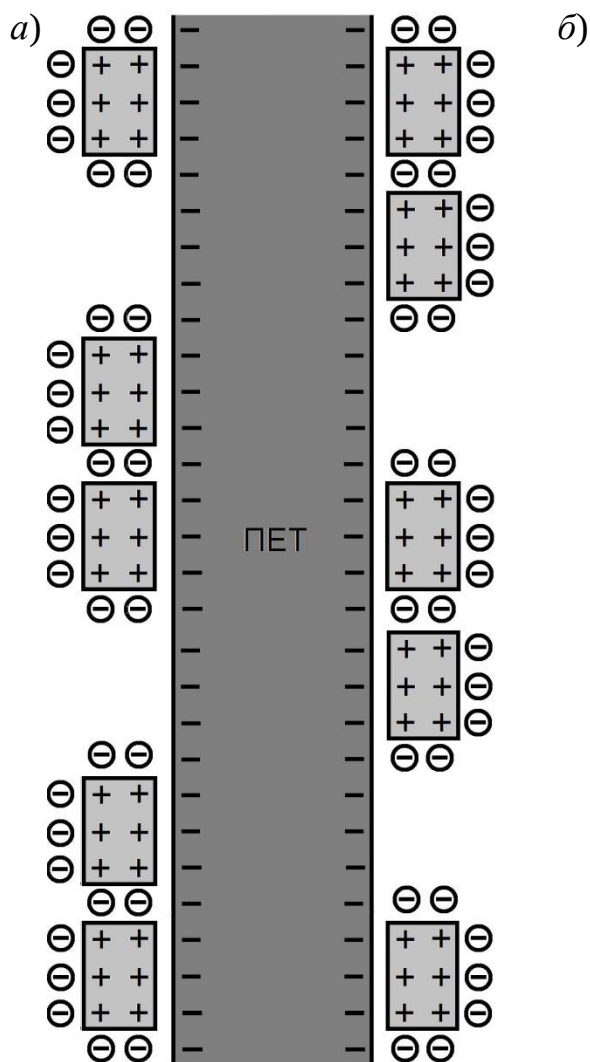


Рисунок 3.5 – Схеми електрогетерогенних контактів між поверхнями поліефірних волокон ПЕТ і C_3AH_6 (а, б, в), а також між C_3AH_6 і AN – алюмогелем $Al(OH)_3$: а, г – через полімолекулярні водні прошарки; б, д – через мономолекулярні водні прошарки; в, е – безпосередньо між потенціалвизначальними іонами



б)

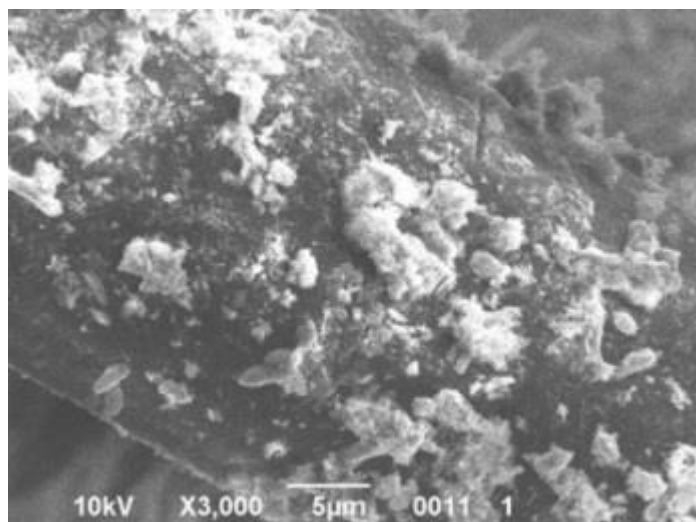
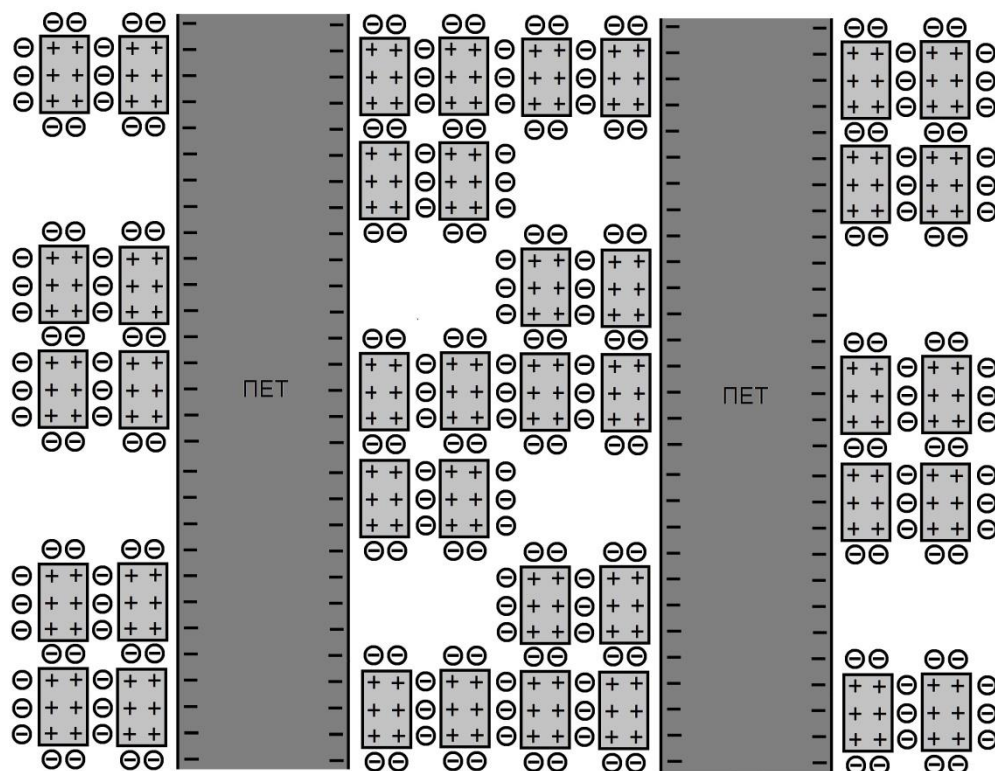


Рисунок 3.6 – Продукти гідратації портландцементу на поверхні поліефірного волокна: *а* – схема електрогетерогенних контактів; *б* – ЕМЗ продуктів гідратації портландцементу на поверхні волокна [80]. Призми зі знаком «+» – кристалогідрати портландиту; кружки зі знаком «-» – гідросилікатний гель *CSH*

а)



б)

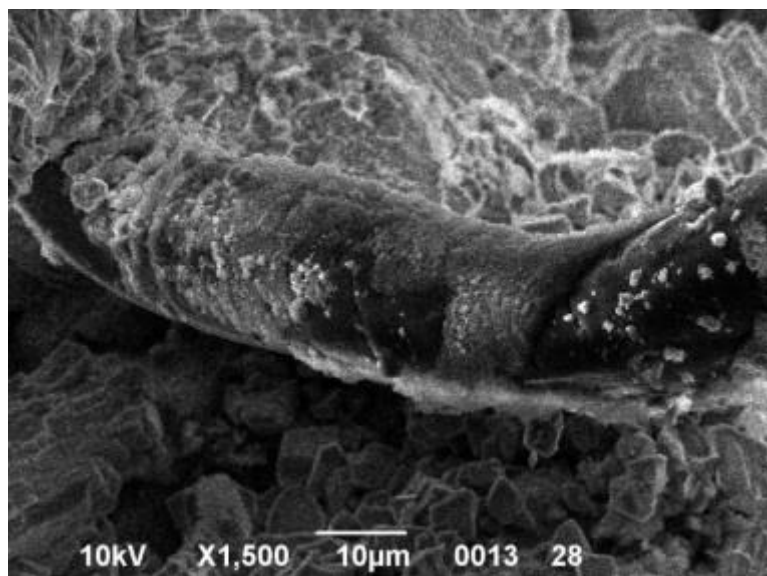
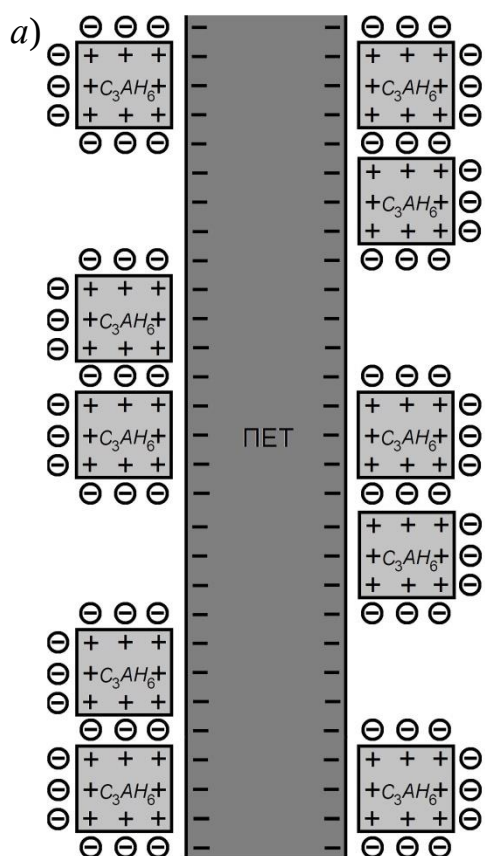


Рисунок 3.7 – Структура композиційного матеріалу із поліефірних волокон і портландцементу: *а* – схема продуктів гідратації між волокнами; *б* – ЕМЗ структури композиційного матеріалу [98]. Призми зі знаком «+» – кристалогідрати портландиту; кружки зі знаком «-» – гідросилікатний гель *CSH*



б)

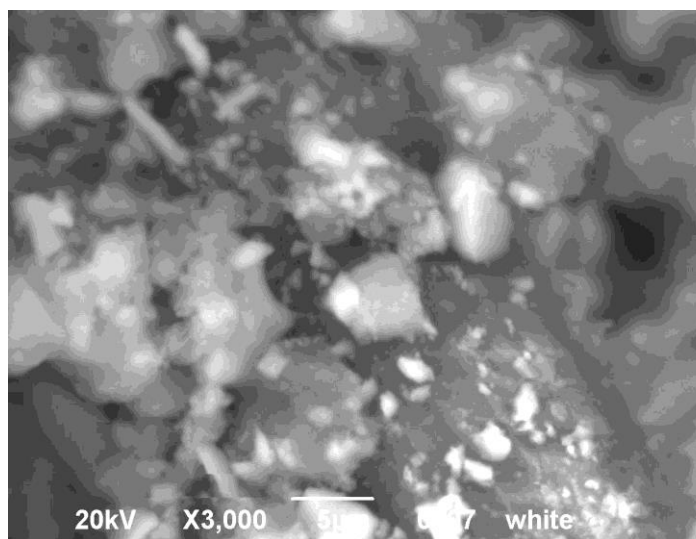
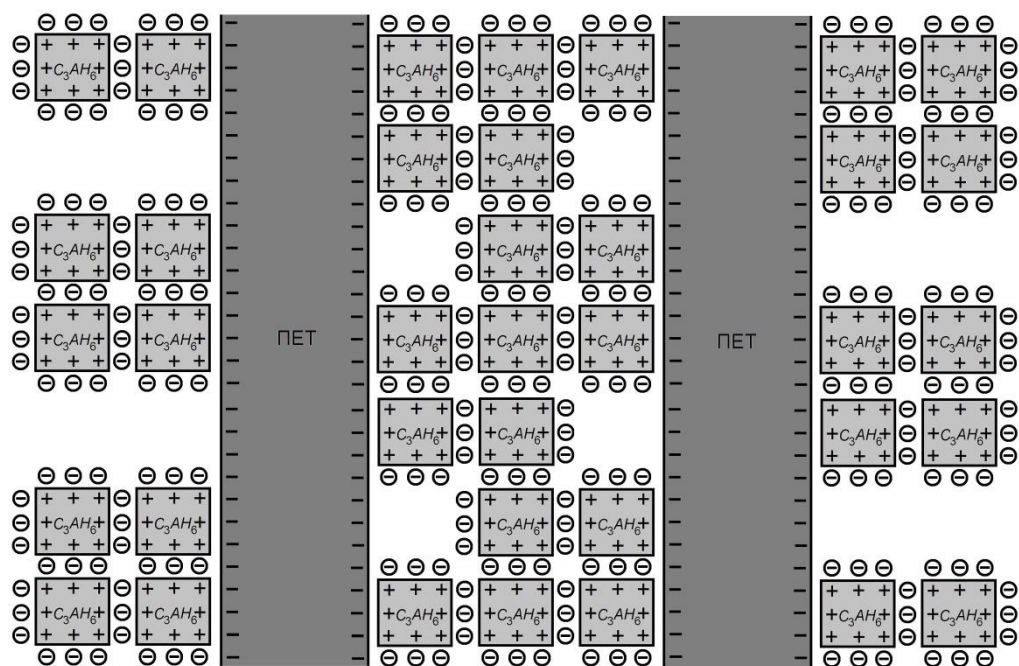


Рисунок 3.8 – Продукти гідратації глиноземистого цементу на поверхні поліефірного волокна: а – схема електрогетерогенних контактів;

б – ЕМЗ продуктів гідратації на поверхні волокна.

Кружки зі знаком «-» – алюмогель $Al(OH)_3$ (п. 4.1)

а)



б)

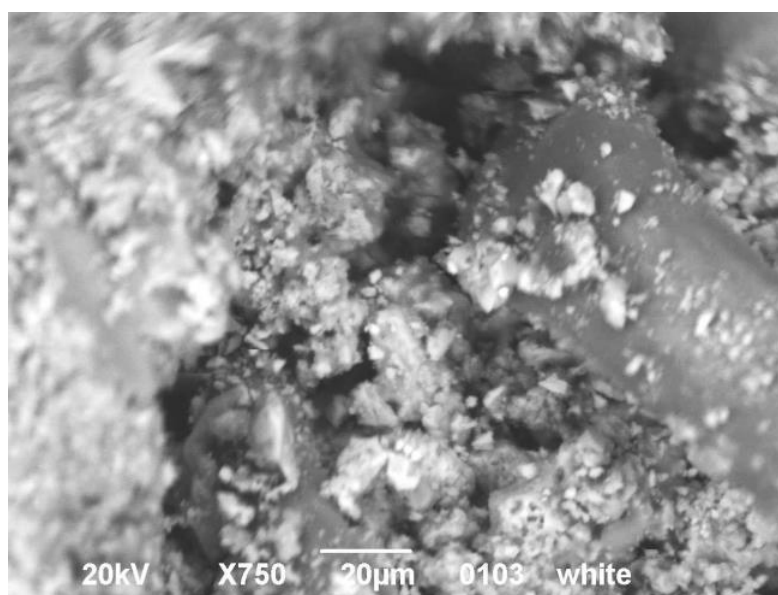


Рисунок 3.9 – Структура композиційного матеріалу із поліефірних волокон і глиноземистого цементу: а – формування електрогетерогенних контактів на поверхні волокна; б – взаємодія між волокнами через продукти гідратації.

Кружки зі знаком «—» – алюмогель $Al(OH)_3$ (п. 4.1)

Міцність цих контактів залежатиме від кількості шарів молекул води в них. Можливі такі випадки:

- перший – між потенціалвизначальними іонами наявні два та більше мономолекулярних шарів H_2O (рис. 3.4, *а, з*, 3.5, *а, з*);
- другий – між потенціалвизначальними іонами наявний мономолекулярний шар H_2O (рис. 3.4, *б, д*, 3.5, *б, д*);
- третій – між потенціалвизначальними іонами молекули H_2O відсутні (рис. 3.4, *в, е*, 3.5, *в, е*).

Розрахуємо міцність елементарних контактів між потенціалвизначальними іонами Ca^{2+} і OH^- згідно із законом Кулона для цих випадків. Розрахункові схеми контактів для цих випадків наведено на рис. 3.10.

Для першого випадку з двома молекулами води між потенціалвизначальними іонами для розриву контакту по червоній лінії на рис. 3.10, *а* сила притягіння в контакті (міцність контакту) складатиметься із іон-іонної взаємодії F_{ii2} між іонами OH^- і Ca^{2+} , іон-дипольних взаємодій між іоном OH^- і молекулою H_2O F_{id21} та іоном Ca^{2+} і молекулою H_2O F_{id22} , диполь-дипольної взаємодії між молекулами H_2O F_{dd2} :

$$F_{\text{сгк2}} = F_{ii2} + F_{id21} + F_{id22} + F_{dd2}; \quad (3.8)$$

$$F_{ii2} = \frac{z_{OH^-} z_{Ca^{2+}} e^2}{4\pi\epsilon\epsilon_0 h_{ii2}^2}; \quad (3.9)$$

$$F_{id21} = \frac{z_{OH^-} e \mu_{H_2O}}{4\pi\epsilon\epsilon_0 h_{id21}^3}; \quad (3.10)$$

$$F_{id22} = \frac{z_{Ca^{2+}} e \mu_{H_2O}}{4\pi\epsilon\epsilon_0 h_{id22}^3}; \quad (3.11)$$

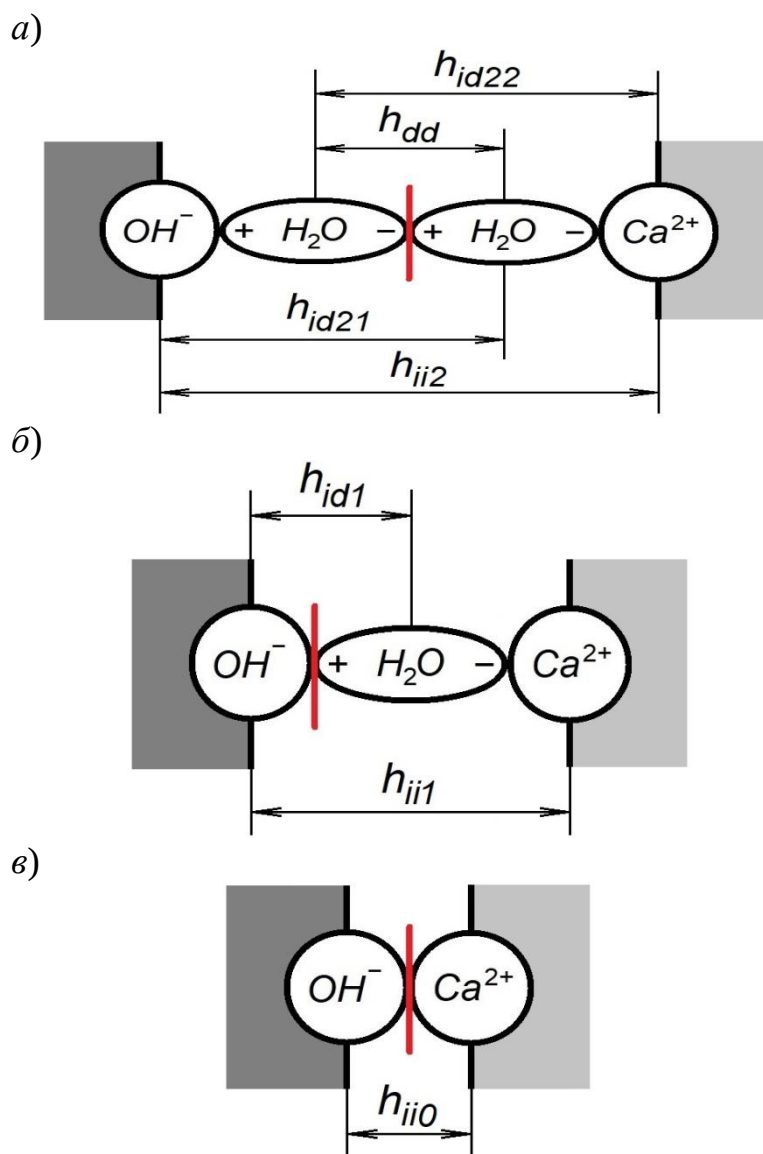


Рисунок 3.10 – Розрахункові схеми елементарних електрогетерогенних контактів для визначення їх міцності (сили притягіння):

a – через два шари молекул H₂O; *б* – через мономолекулярний шар H₂O; *в* – без водного прошарку

$$F_{dd22} = \frac{\mu_{H_2O}^2}{4\pi\epsilon\epsilon_0 h_{dd22}^4}, \quad (3.12)$$

де z_{OH^-} і $z_{Ca^{2+}}$ – валентність іонів OH⁻ і Ca²⁺, 1 і 2, відповідно;

e – елементарний заряд, $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл; μ_{H_2O} – дипольний момент молекули води, $6,17 \cdot 10^{-30}$ Кл·м;

ε – відносна діелектрична проникність середовища, прийmemo 1;

ε_0 – електрична стала, $8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м;

h_{ii2} , h_{id21} , h_{id22} , h_{dd2} – відповідні відстані між центрами іонів та диполів згідно з рис. 3.10, а:

$$h_{ii2} = r_{OH^-} + 2l_{H_2O} + r_{Ca^{2+}} = (1,33 + 2 \cdot 2,75 + 0,99) \cdot 10^{-10} = 7,82 \cdot 10^{-10} \text{ м}; \quad (3.13)$$

$$h_{id21} = r_{OH^-} + 1,5l_{H_2O} = (1,33 + 1,5 \cdot 2,75) \cdot 10^{-10} = 5,455 \cdot 10^{-10} \text{ м}; \quad (3.14)$$

$$h_{id22} = 1,5l_{H_2O} + r_{Ca^{2+}} = (1,5 \cdot 2,75 + 0,99) \cdot 10^{-10} = 5,115 \cdot 10^{-10} \text{ м}; \quad (3.15)$$

$$h_{dd2} = l_{H_2O} = 2,75 \cdot 10^{-10} \text{ м}, \quad (3.16)$$

де r_{OH^-} , $r_{Ca^{2+}}$ – радіуси іонів OH^- , Ca^{2+} , $1,33 \cdot 10^{-10}$ і $0,99 \cdot 10^{-10}$ м, відповідно;

l_{H_2O} – розмір молекули води, $2,75 \cdot 10^{-10}$ м.

Підставляючи значення у рівняння (3.9) – (3.12), а потім 3,8, отримаємо:

$$F_{ii2} = \frac{1 \cdot 2 \cdot (1,6 \cdot 10^{-19})^2}{4\pi \cdot 1 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot (7,82 \cdot 10^{-10})^2} = 7,532 \cdot 10^{-10}, \text{ Н};$$

$$F_{id21} = \frac{1 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 6,17 \cdot 10^{-30}}{4\pi \cdot 1 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot (5,455 \cdot 10^{-10})^3} = 0,547 \cdot 10^{-10}, \text{ Н};$$

$$F_{id22} = \frac{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 6,17 \cdot 10^{-30}}{4\pi \cdot 1 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot (5,115 \cdot 10^{-10})^3} = 1,327 \cdot 10^{-10}, \text{ Н};$$

$$F_{dd2} = \frac{(6,17 \cdot 10^{-30})^2}{4\pi \cdot 1 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot (2,75 \cdot 10^{-10})^4} = 0,599 \cdot 10^{-10}, \text{ Н};$$

$$F_{\text{сгк2}} = (7,532 + 0,547 + 1,327 + 0,599) \cdot 10^{-10} = 1,0 \cdot 10^{-9} \text{ Н}.$$

Для другого випадку з однією молекулою води між потенціалвизначальними іонами для розриву контакту по червоній лінії на

рис. 3.10, б зусилля розриву контакту (сила притягіння в ньому) складатиметься із іон-іонної взаємодії F_{ii1} між іонами OH^- і Ca^{2+} та іон-дипольної взаємодії між іоном OH^- і молекулою H_2O F_{id1} :

$$F_{\text{гк1}} = F_{ii1} + F_{id1}; \quad (3.17)$$

$$F_{ii1} = \frac{z_{OH^-} \cdot z_{Ca^{2+}} \cdot e^2}{4\pi\epsilon\epsilon_0 h_{ii1}^2}; \quad (3.18)$$

$$F_{id1} = \frac{z_{OH^-} \cdot e \mu_{H_2O}}{4\pi\epsilon\epsilon_0 h_{id1}^3}; \quad (3.19)$$

де відстані між центрами іонів та диполлю згідно з рис. 3.10, б:

$$h_{ii1} = r_{OH^-} + l_{H_2O} + r_{Ca^{2+}} = (1,33 + 2,75 + 0,99) \cdot 10^{-10} = 5,07 \cdot 10^{-10} \text{ м}; \quad (3.20)$$

$$h_{id1} = r_{OH^-} + 0,5l_{H_2O} = (1,33 + 0,5 \cdot 2,75) \cdot 10^{-10} = 2,705 \cdot 10^{-10} \text{ м}; \quad (3.21)$$

Підставляючи значення у рівняння (3.18), (3.19), а потім (3.17), отримаємо:

$$F_{ii1} = \frac{1 \cdot 2 \cdot (1,6 \cdot 10^{-19})^2}{4\pi \cdot 1 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot (5,07 \cdot 10^{-10})^2} = 1,792 \cdot 10^{-9} \text{ Н};$$

$$F_{id1} = \frac{1 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 6,17 \cdot 10^{-30}}{4\pi \cdot 1 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot (2,705 \cdot 10^{-10})^3} = 0,897 \cdot 10^{-9} \text{ Н};$$

$$F_{\text{гк1}} = (1,792 + 0,897) \cdot 10^{-9} = 2,689 \cdot 10^{-9} \text{ Н}.$$

Для третього випадку безпосередньої взаємодії потенціалвизначальних іонів без молекул води між для розриву контакту по червоній лінії на рис. 3.10, в зусилля розриву контакту (сила притягіння в ньому) складатиметься лише із іон-іонної взаємодії F_{ii0} між іонами OH^- і Ca^{2+} :

$$F_{\text{егк}0} = F_{ii0}; \quad (3.22)$$

$$F_{ii0} = \frac{z_{\text{OH}^-} z_{\text{Ca}^{2+}} e^2}{4\pi \varepsilon \varepsilon_0 h_{ii0}^2}; \quad (3.23)$$

де відстань між центрами іонів згідно з рис. 3.10, в:

$$h_{ii0} = r_{\text{OH}^-} + r_{\text{Ca}^{2+}} = (1,33 + 0,99) \cdot 10^{-10} = 2,32 \cdot 10^{-10} \text{ м}; \quad (3.24)$$

Підставляючи значення у рівняння (3.23) та (3.17), отримаємо:

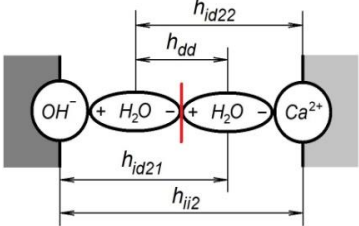
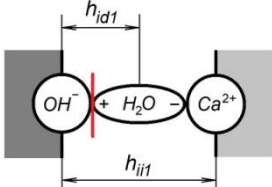
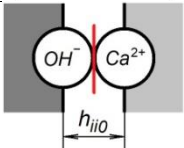
$$F_{ii0} = \frac{1 \cdot 2 \cdot (1,6 \cdot 10^{-19})^2}{4\pi \cdot 1 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot (2,32 \cdot 10^{-10})^2} = 8,558 \cdot 10^{-9} \text{ Н};$$

$$F_{\text{егк}0} = 8,558 \cdot 10^{-9} \text{ Н}.$$

Результати розрахунків узагальнено у табл. 3.4 і на рис. 3.11, на якому наведено залежність зусилля розриву елементарного електрогетерогенного контакту $F_{\text{егк}}$ від відстані між потенціалвизначальними іонами в ньому h_{ii} . Ця залежність в межах h_{ii} від $2,3 \cdot 10^{-10}$ до $30 \cdot 10^{-10}$ м добре апроксимується з коефіцієнтом кореляції $R = 0,986^{0,5} = 0,99$ ступеневим рівнянням:

$$F_{\text{егк}} = 38,732 h_{ii}^{-1,733}.$$

Таблиця 3.4 – Зусилля розриву елементарних електрогетерогенних контактів між потенціалвизначальними іонами на поверхнях продуктів гідратації цементів і поліефірних волокон

№	Схема контакту	Кількість молекул H_2O в контакті	Відстань між ПВІ h_{ii} , $m \cdot 10^{10}$	Зусилля розриву контакту $F_{егк}$, $H \cdot 10^9$	Частка від максимально можливого зусилля розриву (міцності)
1		2	7,82	1,00	0,117
2		1	5,07	2,689	0,314
3		0	2,32	8,558	1

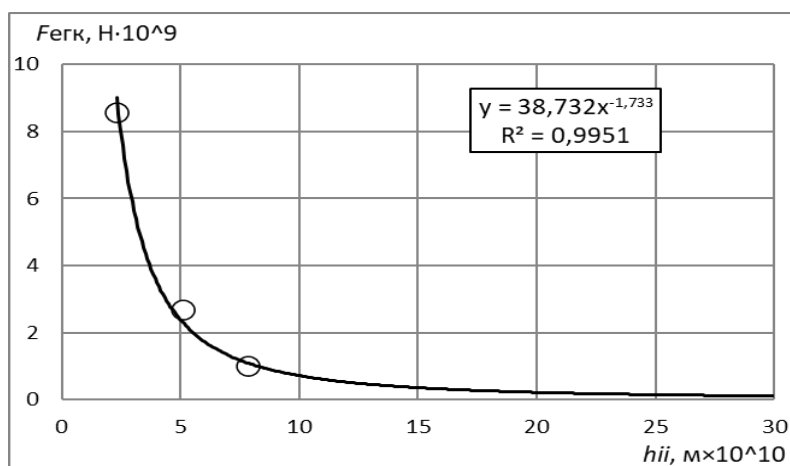


Рисунок 3.11 – Залежність зусилля розриву елементарного електрогетерогенного контакту $F_{егк}$ від відстані між потенціалвизначальними іонами в ньому

Висновки до розділу 3

1. Виконано аналіз хімічного складу, структури, технології отримання поліефірних волокон. Встановлено, що волокна складаються із поліетилентерефталату, функціональним групами якого є неполярні ($-\text{COO}-$) та ароматичні кільця ($-\text{C}_6\text{H}_4-$). Проте ці групи у воді можуть гідролізуватись з утворенням гідроксильних груп OH^- , а на кінцях полімерних ланцюгів можуть міститись гідроксильні групи $-\text{OH}$ та карбоксильні групи $-\text{COOH}$. На поверхні поліефірних волокон містяться змащувачі – низькомолекулярні силікони, поліетиленгліколь, які також містять певну кількість груп $-\text{OH}$. Отже, на поверхні поліефірних волокон, у т.ч. з покриттям із силіконів, поліетиленгліколю у водному середовищі тверднучих цементних паст утворюється певна кількість функціональних груп $-\text{OH}$, COO^- , які є негативно зарядженими активними поверхневими центрами, які здатні утворювати електрогетерогенні контакти з частинками продуктів гідратації цементів, що мають позитивний поверхневий заряд.

2. Визначено електроповерхневі потенціали продуктів гідратації глиноземистого цементу. Встановлено, що рівноважний електроповерхневий потенціал кристалічного гідроалюмінату кальцію C_3AH_6 за $\text{pH} = 11,5$ складає $+0,225$ В, гелю гідроксиду алюмінію $\text{Al}(\text{OH})_3$ – мінус $0,354$ В, отже, в середовищі порового електроліту тверднучого глиноземистого цементу вони мають, відповідно, позитивний та негативний поверхневі заряди і утворюють між собою електрогетерогенні контакти. Електрогетерогенні контакти з негативно зарядженими активними поверхневими центрами на поліефірному волокні утворюють кристали C_3AH_6 , з поверхнями заповнювача – гелю гідроксиду алюмінію $\text{Al}(\text{OH})_3$.

3. Виконано аналіз кристалічної будови C_3AH_6 і $\text{Al}(\text{OH})_3$, встановлено, що потенціалвизначальними іонами їх поверхні є, відповідно, катіон кальцію Ca^{2+} і гідроксил-іон OH^- .

4. Розроблено схеми електрогетерогенних контактів, які забезпечують фізико-механічні властивості дисперсно-армованих поліефірним волокном композиційних матеріалів: із портландцементу – між поверхнею волокна і кристалогідратами портландиту $Ca(OH)_2$, між кристалогідратами портландиту $Ca(OH)_2$ і частинками гідросилікатного гелю; із глиноземистого цементу – між поверхнею волокна і кристалогідратами C_3AH_6 , між кристалогідратами C_3AH_6 і гелем гідроксиду алюмінію $Al(OH)_3$.

5. Розрахунками встановлено, що зусилля розриву елементарного електрогетерогенного контакту залежить від кількості шарів молекул H_2O в ньому. За відсутності H_2O зусилля розриву забезпечується безпосередньою іон-іонною взаємодією між Ca^{2+} і OH^- і є максимальним, за одного ряду H_2O визначається іон-дипольною взаємодією між Ca^{2+} і H_2O і складає 0,31 від максимального, за двох рядів H_2O визначається послідовною диполь-дипольною взаємодією між H_2O і складає 0,12 від максимального.

РОЗДІЛ 4

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТЕЙ ВЛАСТИВОСТЕЙ КОМПОЗИЦІЙНОГО МАТЕРІАЛУ ІЗ ЦЕМЕНТУ ТА ПОЛІЕФІРНОГО ВОЛОКНА ВІД ЇЇ СКЛАДУ

4.1 Результати фізико-хімічних досліджень взаємодії продуктів гідратації цементу і поліефірних волокон

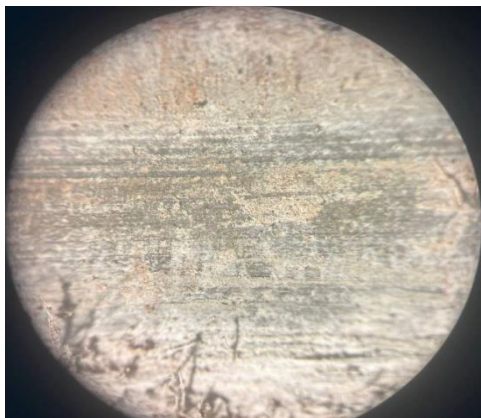
4.1.1 Мікроскопічні дослідження композиційного матеріалу із цементу і поліефірних волокон

Знімки зрізів композиційного матеріалу із портландцементу, глиноземистого цементу і поліефірних волокон наведено на рис. 4.1. Як видно із рис. 4.1, структура матеріалу на портландцементі та глиноземистому цементі в цілому схожа. На зразках матеріалу як на портландцементі, так і на глиноземистому цементі за збільшення $\times(7,5-12,5)$ наявні ділянки:

- добре ущільнені, на яких волокна у цементному камені майже не проглядаються;
- задовільно ущільнені, на яких проглядаються волокна;
- незадовільно ущільнені з прошарками незаповненого цементним каменем волокнистого матеріалу.

Дослідження значної кількості зразків дозволило пов'язати наявність незадовільно ущільнених ділянок з товщиною НМОС – у разі товщини НМОС 10 мм незадовільно ущільнені ділянки не спостерігались, всі незадовільно ущільнені ділянки спостерігались на зразках, виготовлених із НМОС товщиною 20 мм.

а)



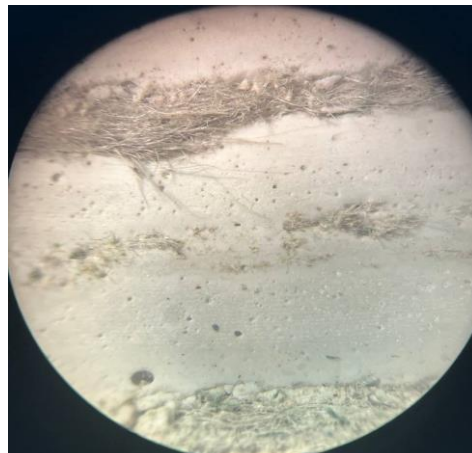
б)



в)



г)



д)



е)



Рисунок 4.1 – Оптичні знімки зрізів композиційного матеріалу із портландцементу (а, в, д), глиноземистого цементу (б, г, е) і поліефірних волокон: а, б – добре ущільнені ділянки; в, г – задовільно ущільнені ділянки; д, е – незадовільно ущільнені ділянки з прошарками незаповненого цементним каменем волокнистого матеріалу; $\times(7,5-12,5)$

4.1.2 Електронно-мікроскопічні дослідження композиційного матеріалу із цементу і поліефірних волокон

На рис. 4.2–4.5 наведені електронно-мікроскопічні знімки поверхні відколів композиційного матеріалу із портландцементу (ліворуч), глиноземистого цементу (праворуч) і поліефірних волокон. Збільшення знімків – від $\times 500$ до $\times 10000$.

Електронно-мікроскопічні дослідження зосереджені на контактній зоні між продуктами гідратації цементів і поверхнею волокна. Із рис. 4.2–4.5 видно, що за збільшеннями $\times(500-10000)$ структура матеріалу на портландцементі та глиноземистому цементі в цілому схожа.

В більшості зразків, на яких спостерігаються волокна, їх поверхня вкрита дискретними частинками продуктів гідратації цементів. В більшості зразків на обох цементах вкрито близько половини поверхні волокна (рис. 4.2, в, д, е, 4.3, а, б, в, г, 4.4, б, г, е). В зразках на обох цементах зустрічаються окремі волокна без продуктів гідратації на поверхні (рис. 4.2, а, г). Проте волокна, майже вся поверхня яких щільно вкрита продуктами гідратації, зустрічаються лише у зразках на глиноземистому цементі (рис. 4.2, а, 4.3, е), а відбитки від волокон з гладкою поверхнею зустрічаються лише у зразках на портландцементі. Це свідчить про дещо кращу взаємодію з поверхнею волокон продуктів гідратації глиноземистого цементу порівняно з продуктами гідратації портландцементу.

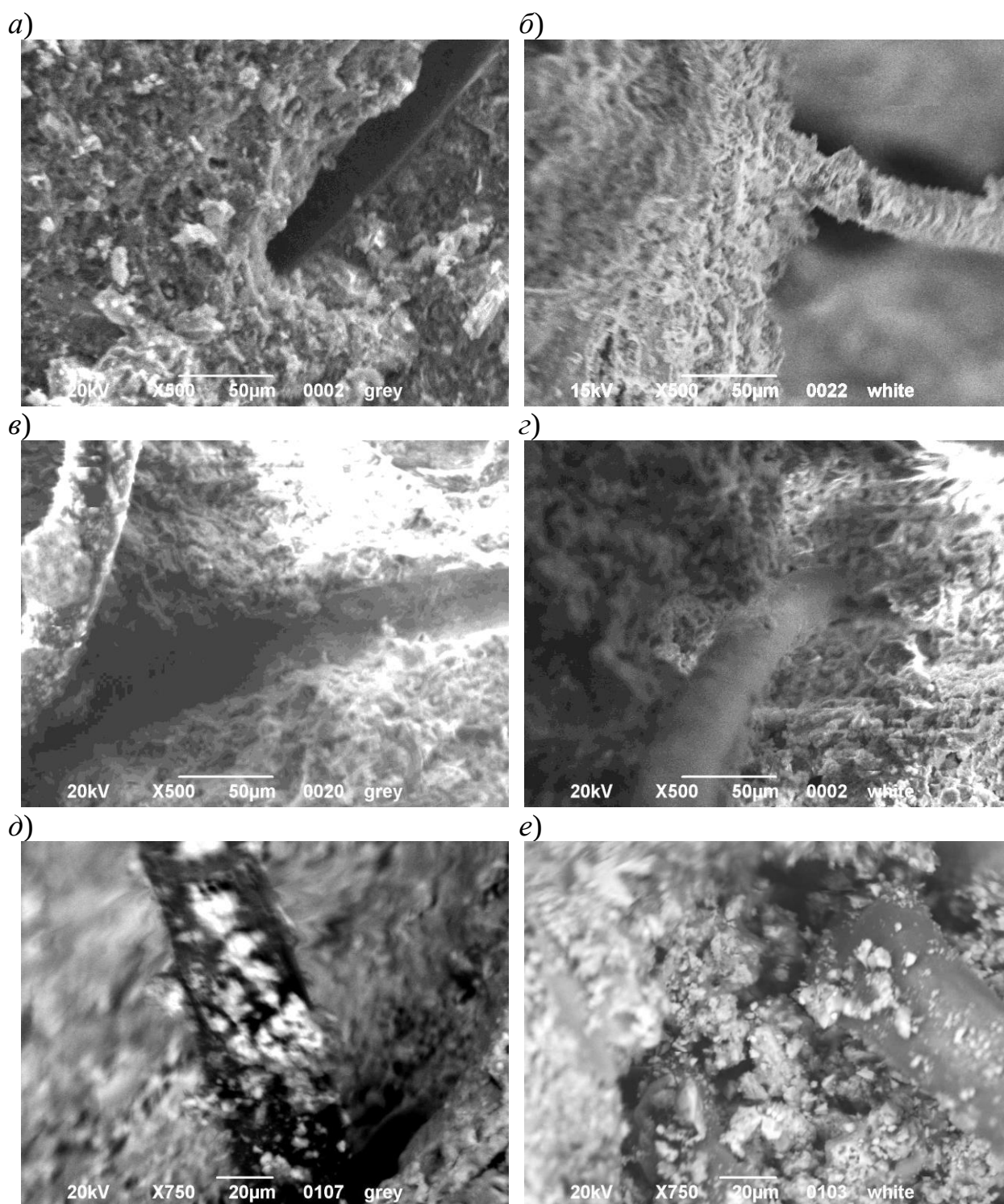


Рисунок 4.2 – Електронно-мікроскопічні знімки (ЕМЗ) відколів композиційного матеріалу із портландцементу (grey, *a*, *в*, *д*), глиноземистого цементу (white, *б*, *г*, *е*) і поліефірних волокон: *a–г* – $\times 500$; *д*, *е* – $\times 750$

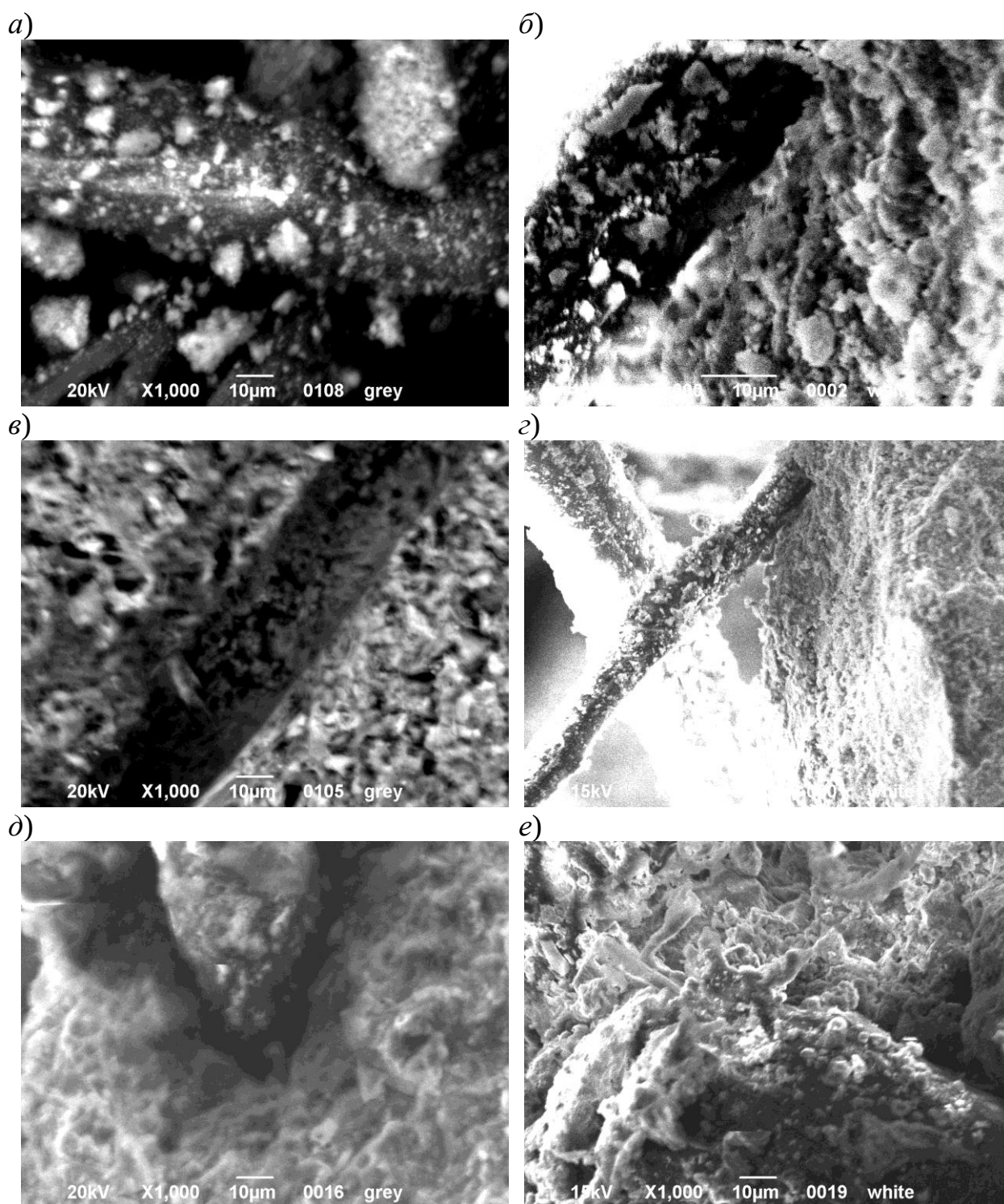


Рисунок 4.3 – Електронно-мікроскопічні знімки відколів композиційного матеріалу із портландцементу (grey, *a*, *c*, *d*), глиноземистого цементу (white, *б*, *г*, *е*) і поліефірних волокон; $\times 1000$

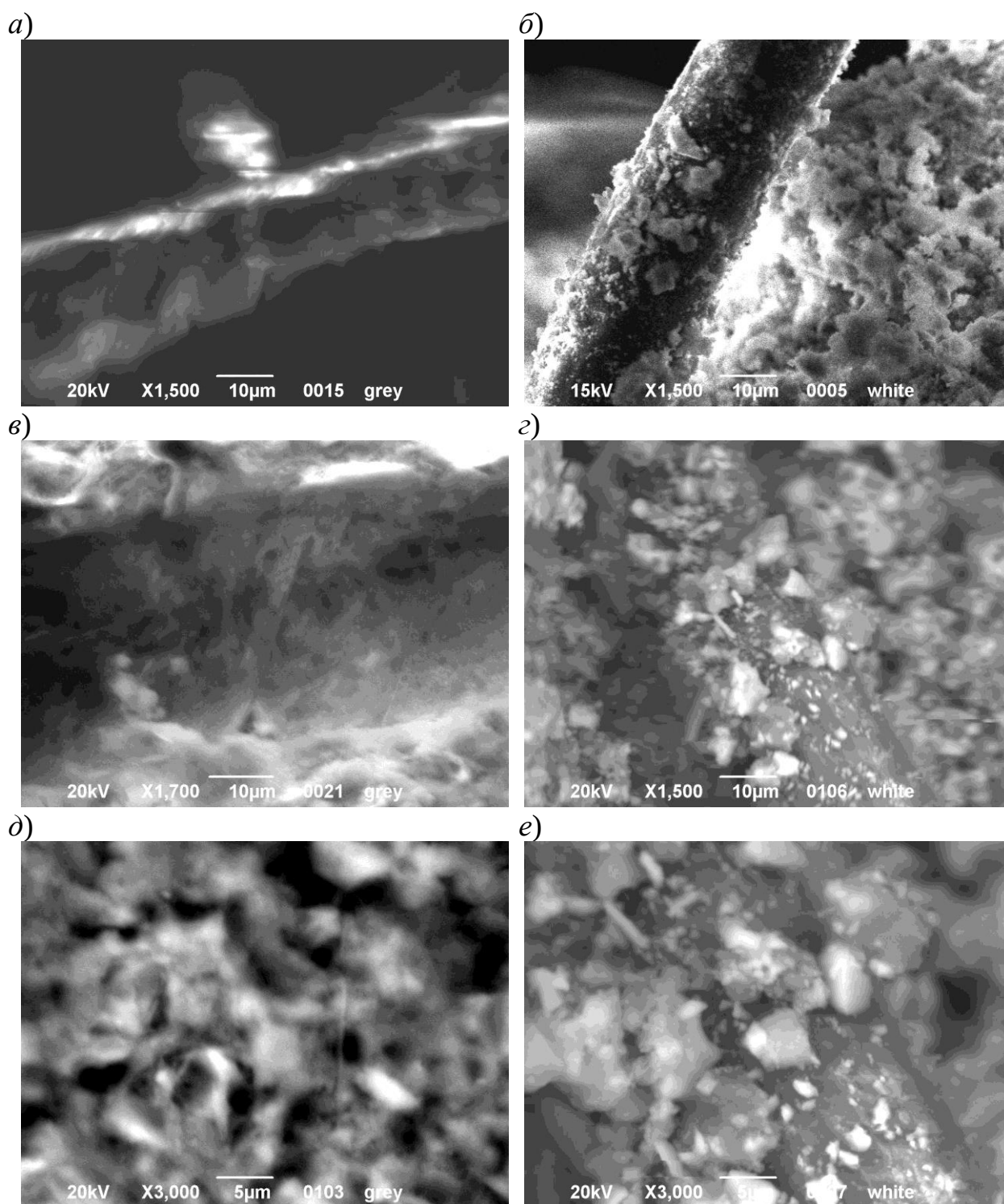


Рисунок 4.4 – Електронно-мікроскопічні знімки відколів композиційного матеріалу із портландцементу (grey, *a*, *c*, *d*), глиноземистого цементу (white, *b*, *e*) і поліефірних волокон: *a*, *b*, *c* – $\times 1500$; *c* – $\times 1700$; *d*, *e* – $\times 3000$

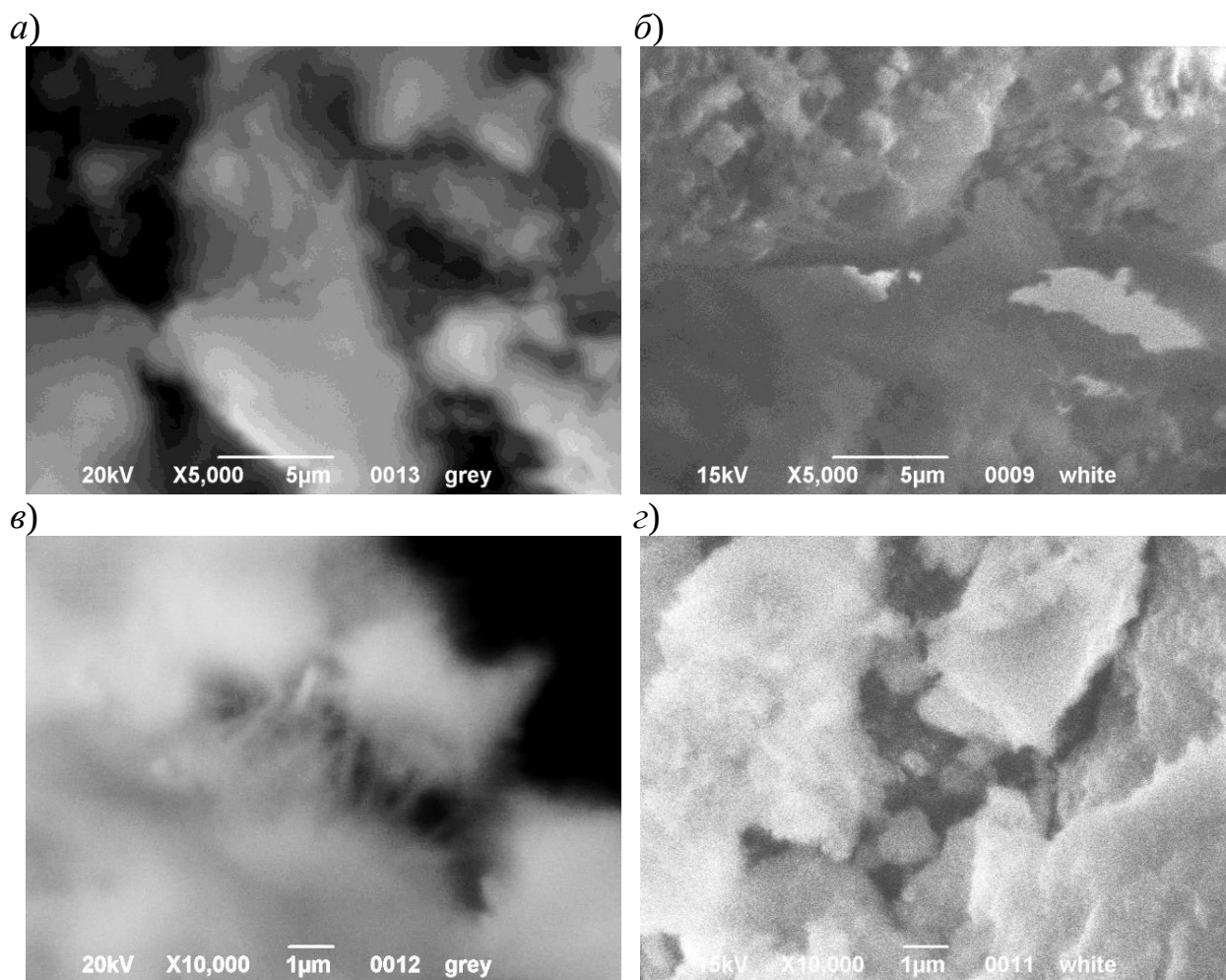


Рисунок 4.5 – Електронно-мікроскопічні знімки відколів
композиційного матеріалу із портландцементу (grey, *а, в*),
глиноземистого цементу (white, *б, з*) і поліефірних волокон:
а, б – $\times 5000$; *в* – $\times 10000$

Морфологія продуктів гідратації цементів на поверхні волокон та в зазорах між ними також схожа – в зразках із обох цементів спостерігаються кристали недосконалої ізометричної форми з шорсткою поверхнею розміром декілька мкм, а також більш дрібні частинки. У зразках із портландцементу окремі з цих кристалів за формою близькі до гексагональних пластин (рис. 4.2, *в*, 4.3, *а*), що свідчить про те, що цими кристалами є портландит [99, 100]. У зразках із глиноземистого цементу окремі з цих кристалів близькі за

формою до кубічних (рис. 4.4, *г*), що свідчить про те, що цими кристалами є гідроалюмінат кальцію C_3AH_6 [62, 99, 100]. У зразках із портландцементу за збільшення не менше $\times 10000$ спостерігаються голчасті або волокнисті кристали розміром менше 1 мкм, характерні для гідросилікатів кальцію [99, 100]. У зразках із глиноземистого цементу навіть за збільшення $\times 10000$ спостерігається аморфна маса, яка, ймовірно, є гелем гідроксиду алюмінію $Al(OH)_3$. Безпосередньо на поверхні волокон спостерігаються саме кристали, наприклад, гексагональна пластинка портландиту на рис. 4.2, *в* або кубічні кристали C_3AH_6 на рис. 4.4, *в*. В цілому ЕМЗ рис. 4.2–4.5 підтверджують припущення про структуру продуктів гідратації портландцементу і глиноземистого цементу на поверхні поліефірного волокна, наведену на рис. 3.6, 3.7 і 3.8, 3.9, відповідно.

4.1.3 Рентгенівський мікроаналіз продуктів гідратації в контактній зоні з поверхнею поліефірних волокон

Більш точну інформацію про склад продуктів гідратації портландцементу і глиноземистого цементу на поверхні поліефірного волокна отримано за допомогою рентгенівського мікроаналізу.

Результати рентгенівського мікроаналізу продуктів гідратації цементу в контактній зоні з поверхнею поліефірних волокон наведені: портландцементу – на рис. 4.6–4.10 і в табл. 4.1–4.4; глиноземистого цементу – на рис. 4.11–4.13 і в табл. 4.5–4.8.

В таблицях вміст елементів на ділянках поверхні відколів перераховано у вміст відповідних оксидів через відношення їх молекулярних мас:

$$M_{CaO}/M_{Ca} = (40,08+16)/40,08 = 1,399;$$

$$M_{SiO_2}/M_{Si} = (28,09+2\cdot 16)/28,09 = 2,139;$$

$$M_{Al_2O_3}/M_{2Al} = (2\cdot 26,98+3\cdot 16)/(2\cdot 26,98) = 1,89;$$

$$M_{Fe_2O_3}/M_{2Fe} = (2\cdot 55,85+3\cdot 16)/(2\cdot 55,85) = 1,43.$$

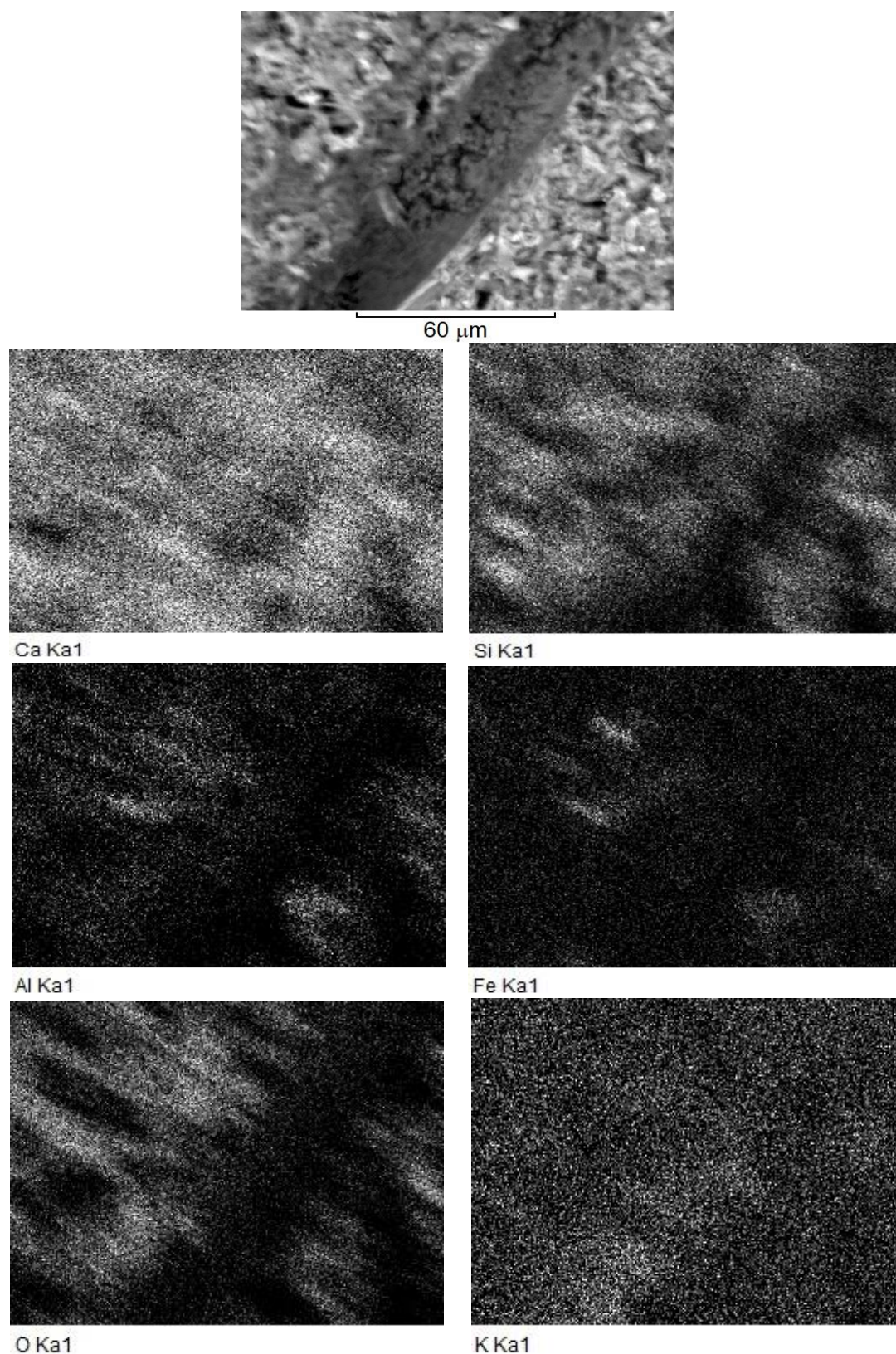


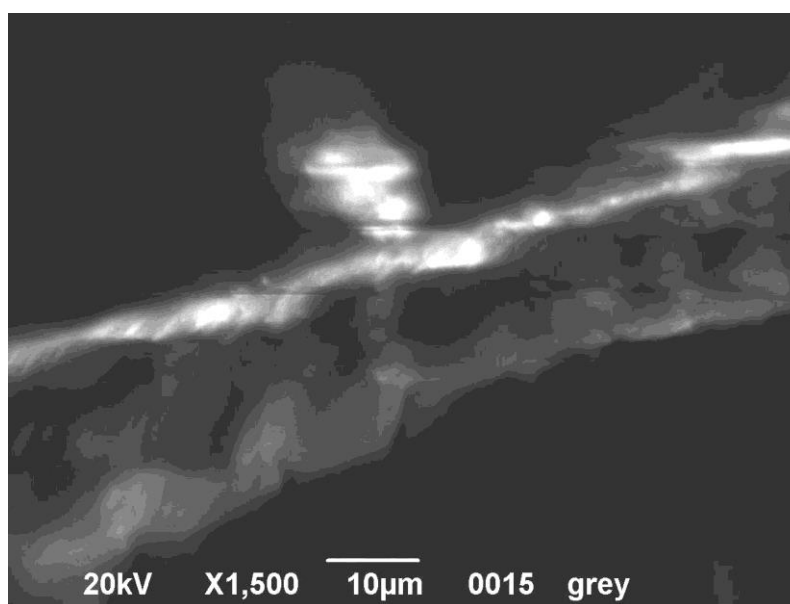
Рисунок 4.6 – ЕМЗ поверхні композиційного матеріалу із
портландцементу і поліефірних волокон
(фрагмент рис. 4.3, в) і рентгенівські карти
розподілу елементів по ній $\times 1000$

Таблиця 4.1 – Інтегральний розподіл елементів і оксидів по поверхні рентгенівської карти рис. 4.6. Атоми вуглецю (волокна) із аналізу виключені

Елемент	Умовна концентрація	Інтенсивність	Масовий %	Масовий % σ	Атомний %	Оксид	Мас. % оксиду	Число іонів
<i>Ca</i>	196,24	1,0244	46,96	0,07	29,54	<i>CaO</i>	65,70	6,32
<i>Si</i>	33,16	0,8650	9,40	0,04	8,44	<i>SiO₂</i>	20,11	1,81
<i>Al</i>	6,64	0,7815	2,08	0,02	1,95	<i>Al₂O₃</i>	3,94	0,42
<i>Fe</i>	7,14	0,8119	2,16	0,04	0,97	<i>Fe₂O₃</i>	3,08	0,21
<i>Na</i>	0,93	0,6758	0,34	0,03	0,37	<i>Na₂O</i>	0,45	0,08
<i>K</i>	5,43	1,1669	1,14	0,02	0,74	<i>K₂O</i>	1,37	0,16
<i>Mg</i>	1,21	0,6596	0,45	0,02	0,47	<i>MgO</i>	0,75	0,10
<i>Ti</i>	0,41	0,7320	0,14	0,02	0,07	<i>TiO₂</i>	0,23	0,02
<i>S</i>	6,46	0,9145	1,73	0,02	1,36	<i>SO₃</i>	4,32	0,29
<i>Cl</i>	0,15	0,8227	0,04	0,02	0,03		0,00	0,01
<i>O</i>			35,56	0,06	56,06			11,99
Разом			100,00			Сума катіонів		9,40

В табл. 4.9 узагальнено оксидний склад продуктів гідратації портландцементу і глиноземистого цементу на границі розподілу з поверхнею поліефірних волокон.

a)



б)

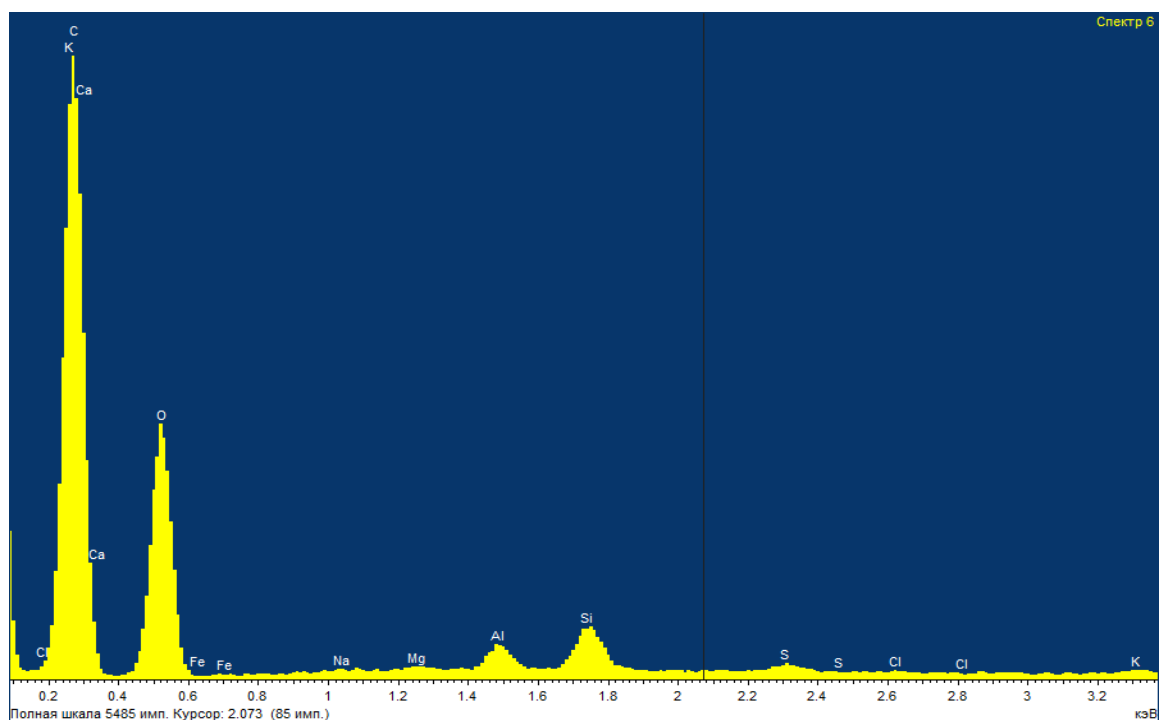


Рисунок 4.7 – ЕМС поліефірного волокна в композиційному матеріалі (фрагмент рис. 4.4, а), $\times 750$ (а) і рентгенівський спектр його поверхні (б)

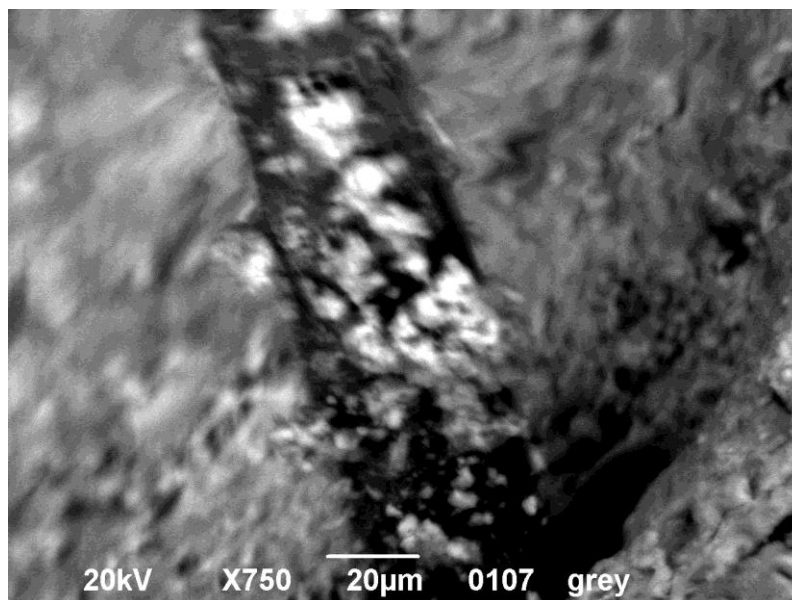


Рисунок 4.8 – ЕМС продуктів гідратації портландцементу на поверхні волокна (фрагмент рис. 4.2, б)

Таблиця 4.2 – Інтегральний розподіл елементів і оксидів по поверхні продуктів гідратації на поверхні волокна (рис. 8). Атоми вуглецю (волокна) із аналізу виключені

Елемент	Умовна концентрація	Інтенсивність	Масовий %	Масовий % σ	Атомний %	Оксид	Мас. % оксиду	Число іонів
<i>Ca</i>	129,71	1,0206	47,09	0,16	29,63	<i>CaO</i>	65,88	6,34
<i>Si</i>	21,06	0,8706	8,96	0,08	8,05	<i>SiO₂</i>	19,18	1,72
<i>Al</i>	3,76	0,7838	1,78	0,05	1,66	<i>Al₂O₃</i>	3,36	0,36
<i>Fe</i>	3,47	0,8109	1,59	0,09	0,72	<i>Fe₂O₃</i>	2,27	0,15
<i>Na</i>	0,62	0,6786	0,34	0,06	0,37	<i>Na₂O</i>	0,46	0,08
<i>K</i>	5,75	1,1660	1,83	0,05	1,18	<i>K₂O</i>	2,20	0,25
<i>Mg</i>	0,80	0,6619	0,45	0,05	0,46	<i>MgO</i>	0,74	0,10
<i>Ti</i>	0,24	0,7300	0,12	0,05	0,06	<i>TiO₂</i>	0,20	0,01
<i>S</i>	5,69	0,9211	2,29	0,05	1,80	<i>SO₃</i>	5,72	0,39
<i>O</i>			35,56	0,16	56,06			12,00
Разом			100,00			Сума катіонів		9,40

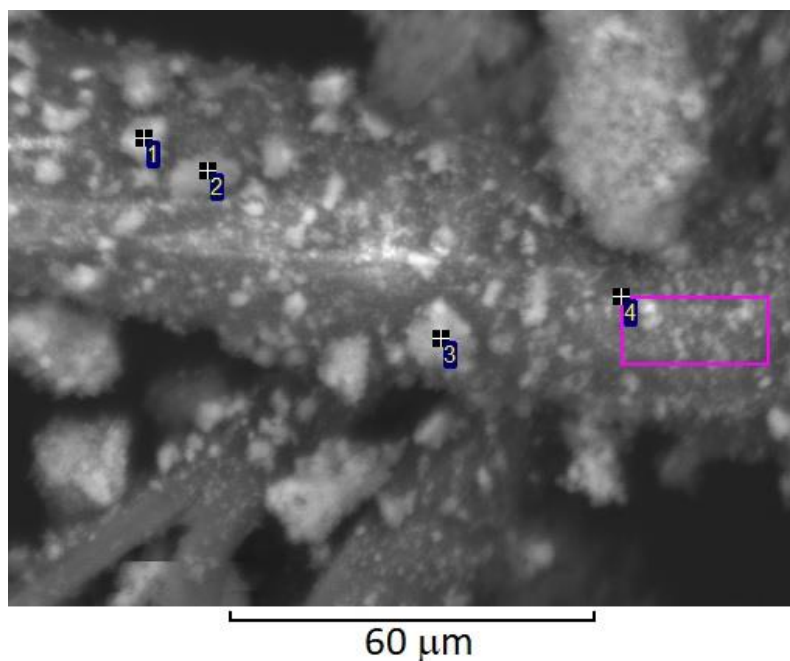


Рисунок 4.9 – ЕМЗ продуктів гідратації портландцементу на поверхні волокна (фрагмент рис. 4.3, а) з ділянками поверхні (частинками), з яких отримано рентгенівські спектри

Таблиця 4.3 – Інтегральний розподіл елементів по поверхні частинок продуктів гідратації портландцементу на поверхні волокна (рис. 9)

№ спектри (частинки)	Вміст елемента, %											
	C	Ca	Si	Al	Fe	Na	K	Mg	Ti	S	O	Разом
1	19,27	11,89	3,93	0,67	0,40	0,13	0,49	0,16	0,04	0,57	62,45	100,00
2	21,75	9,34	1,91	0,39	0,40	0,14	0,36	0,09	0,03	0,40	65,18	100,00
3	19,19	13,58	2,90	0,61	0,45	0,17	0,67	0,12	0,04	0,54	61,71	100,00
4	22,35	8,98	1,50	0,40	0,11	0,05	0,30	0,17	0,00	0,30	65,86	100,00
5*	18,49	12,68	3,95	0,68	0,80	0,06	2,23	0,07	0,05	0,26	60,72	100,00

* частинка 5 за межами поля зору ЕМЗ в об'ємі цементного каменю

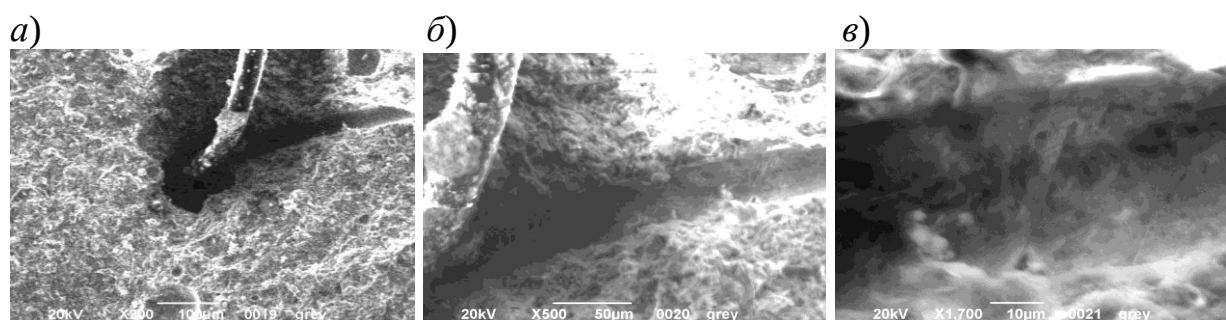


Рисунок 4.10 – ЕМЗ поверхні портландцементного каменю, яка сформувалась на поверхні волокна (фрагмент рис. 4.3, в з різними збільшеннями):

a – $\times 200$; *б* – $\times 500$; *в* – $\times 1700$

Таблиця 4.4 – Інтегральний розподіл елементів по поверхні відбитку волокна на портландцементному камені (рис. 4.10). Атоми вуглецю (волокон) із аналізу виключені

Елемент	Умовна концентрація	Інтенсивність	Масовий %	Масовий % σ	Атомний %	Оксид	Мас. % оксиду	Число іонів
Ca	102,98	1,0494	59,15	0,21	38,96	CaO	82,77	8,74
Si	8,11	0,8781	5,57	0,09	5,23	SiO ₂	11,91	1,17
Al	0,94	0,7754	0,73	0,06	0,72	Al ₂ O ₃	1,39	0,16
Fe	0,76	0,8065	0,57	0,10	0,27	Fe ₂ O ₃	0,81	0,06
Na	0,21	0,6590	0,19	0,08	0,22	Na ₂ O	0,26	0,05
K	0,66	1,2391	0,32	0,05	0,22	K ₂ O	0,39	0,05
Mg	0,11	0,6478	0,10	0,06	0,11	MgO	0,17	0,02
S	1,47	0,9610	0,92	0,06	0,76	SO ₃	2,30	0,17
O			32,44	0,19	53,51			12,00
Разом			100,00			Сума катіонів		10,42

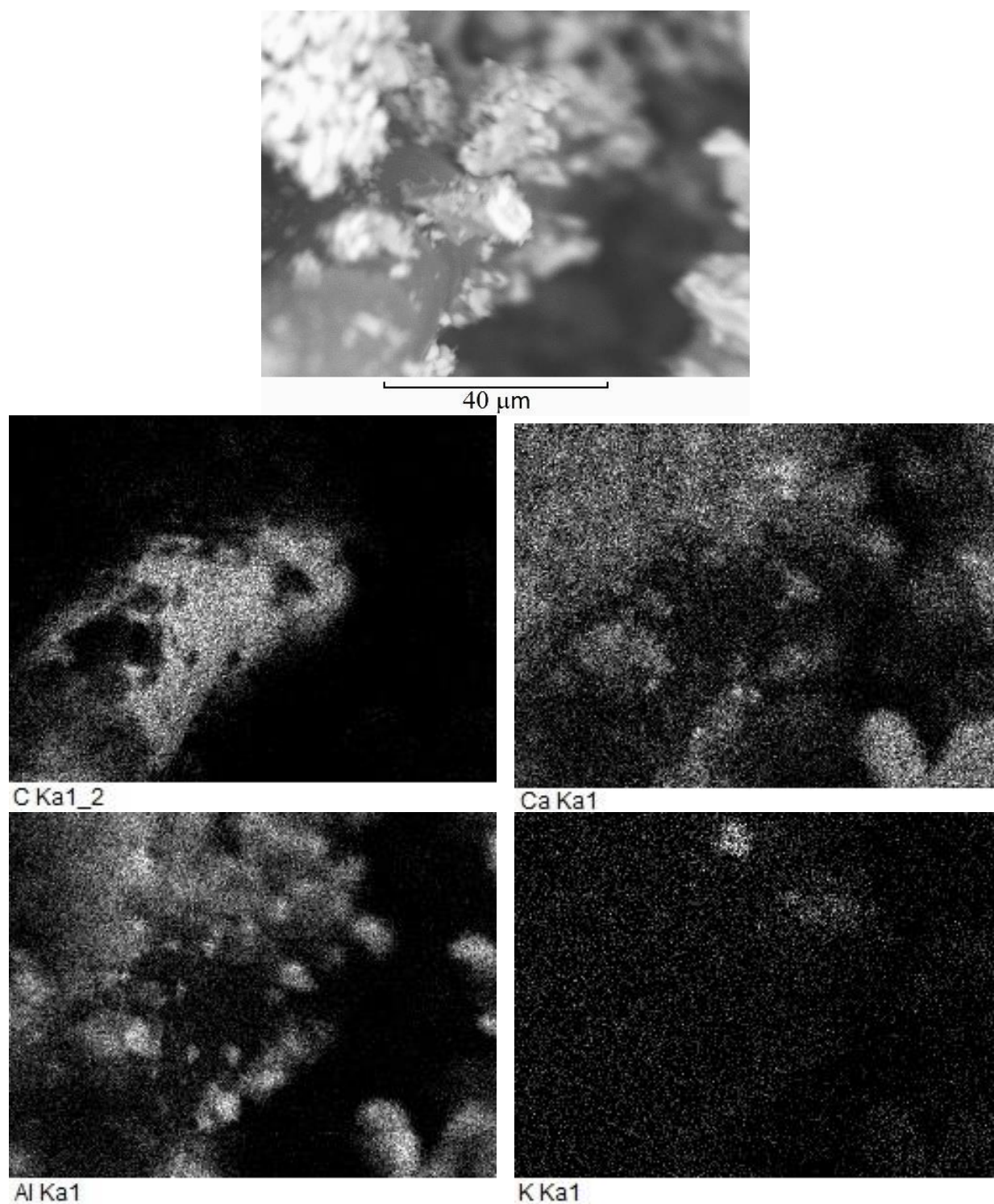


Рисунок 4.11 – ЕМЗ поверхні композиційного матеріалу із глиноземистого цементу та поліефірних волокон і рентгенівські карти розподілу елементів по ній. На карті *Al* ділянки сірого кольору можуть відповідати гідрогарніту $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 6H_2O$, білого – гідроксиду алюмінію $Al(OH)_3$

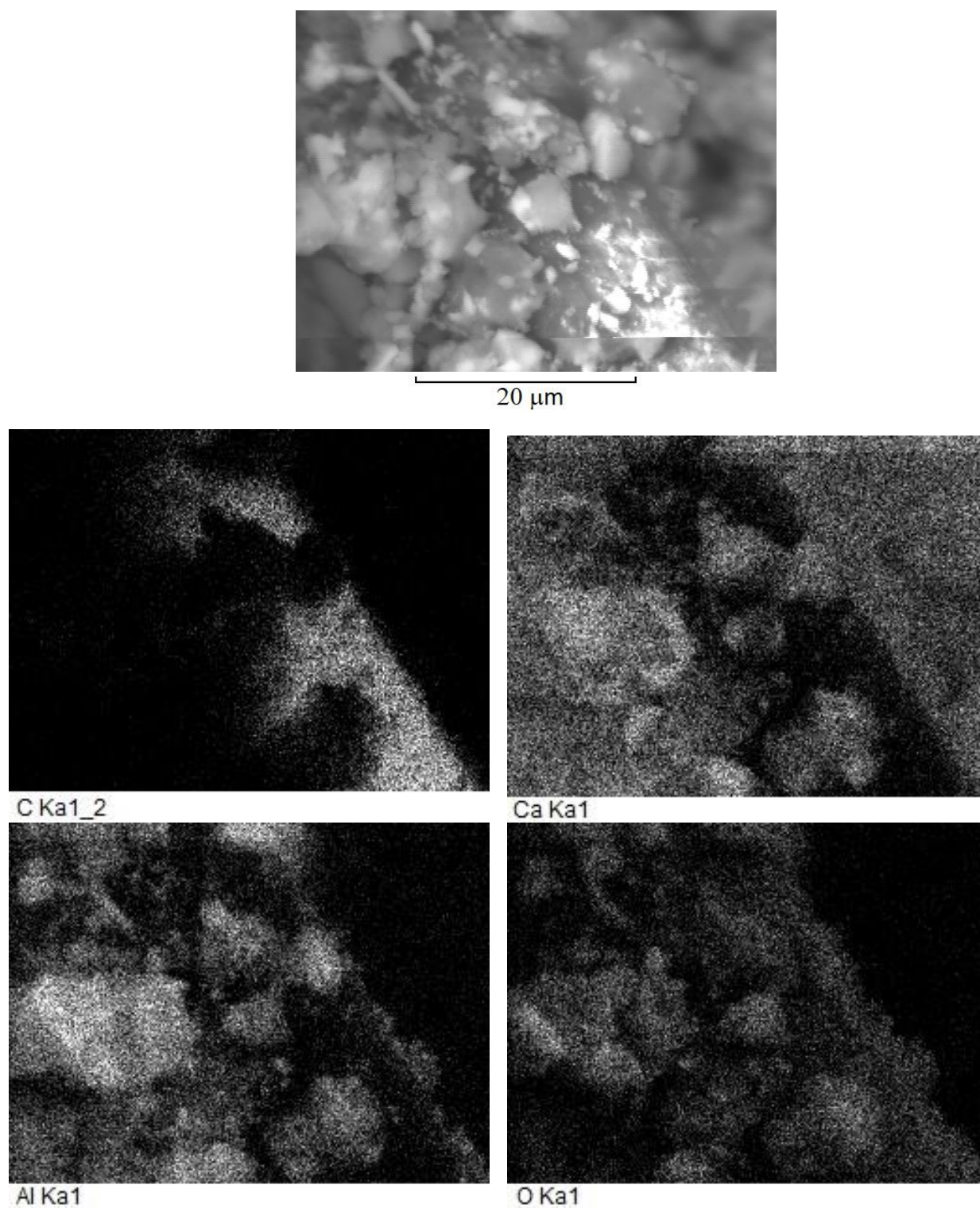


Рисунок 4.12 – ЕМЗ поверхні композиційного матеріалу із глиноземистого цементу та поліефірних волокон і рентгенівські карти розподілу елементів по ній

Таблиця 4.5 – Інтегральний розподіл елементів по поверхні рентгенівських карт рис. 4.11

Елемент	Умовна концентрація	Інтенсивність	Масовий %	Масовий % σ	Атомний %
<i>C</i>	114,37	0,6085	22,25	0,20	31,72
<i>Ca</i>	124,66	0,9925	14,87	0,06	6,35
<i>Al</i>	81,91	0,8141	11,91	0,05	7,56
<i>Si</i>	0,49	0,7681	0,08	0,01	0,05
<i>Fe</i>	0,63	0,8005	0,09	0,02	0,03
<i>Na</i>	0,70	0,7289	0,11	0,01	0,08
<i>S</i>	0,22	0,8974	0,03	0,01	0,02
<i>Cl</i>	0,21	0,8033	0,03	0,01	0,02
<i>O</i>	228,21	0,5336	50,63	0,16	54,18
Разом			100,00		

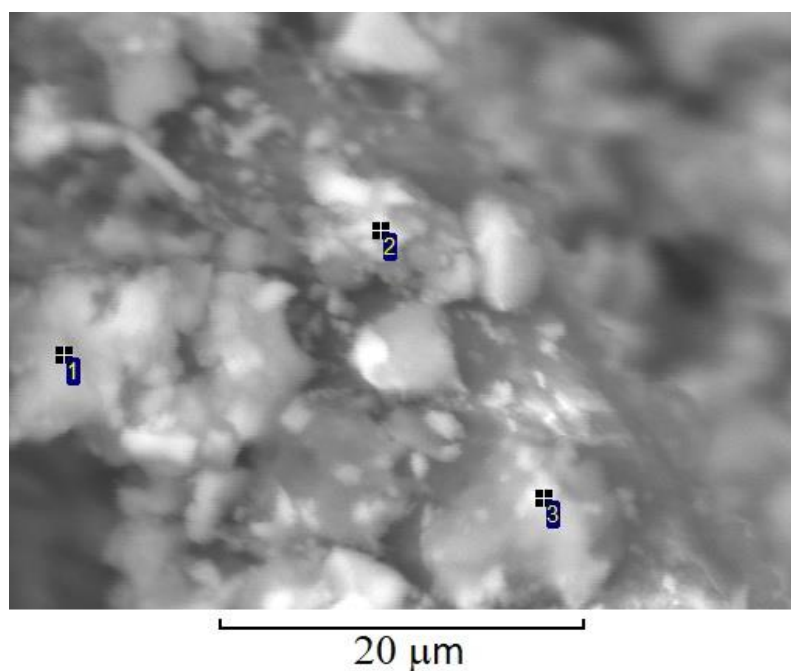


Рисунок 4.13 – Електронно-мікроскопічний знімок продуктів гідратації глиноземистого цементу на поверхні волокна з фрагментами поверхні (частинками), з яких отримано рентгенівські спектри

Таблиця 4.6 – Інтегральний розподіл елементів і оксидів по поверхні рентгенівської карти рис. 4.12. Атоми вуглецю (волокна) із аналізу виключені

Елемент	Умовна концентрація	Інтенсивність	Масовий %	Масовий % σ	Атомний %	Оксид	Мас. % оксиду	Число іонів
<i>Ca</i>	124,66	1,0103	34,33	0,07	20,13	<i>CaO</i>	48,03	4,32
<i>Al</i>	81,91	0,8504	26,80	0,06	23,34	<i>Al₂O₃</i>	50,63	5,01
<i>Si</i>	0,49	0,6729	0,20	0,02	0,17	<i>SiO₂</i>	0,43	0,04
<i>Fe</i>	0,63	0,8192	0,21	0,05	0,09	<i>Fe₂O₃</i>	0,31	0,02
<i>Na</i>	0,70	0,7716	0,25	0,03	0,26	<i>Na₂O</i>	0,34	0,06
<i>S</i>	0,22	0,8497	0,07	0,02	0,05	<i>SO₃</i>	0,18	0,01
<i>Cl</i>	0,21	0,7842	0,08	0,02	0,05		0	0,01
<i>O</i>			38,06	0,08	55,91			11,99
Разом			100,00			Сума катіонів		9,40

Таблиця 4.7 – Інтегральний розподіл елементів по поверхні частинок продуктів гідратації глиноземистого цементу на поверхні волокна. Атоми вуглецю (волокна) із аналізу виключені

№ спектра (частинки)	Вміст елементів, мас.%								
	<i>Ca</i>	<i>Al</i>	<i>Si</i>	<i>Fe</i>	<i>Na</i>	<i>Mg</i>	<i>S</i>	<i>O</i>	Разом
1	12,47	18,87	0,10	0,04	0,16	0,10	0,03	68,22	100,00
2	19,49	19,11	0,09	0,11	0,17	0,05	0,20	60,78	100,00
3	15,26	18,54	0,14	0,08	0,25	0,06	0,05	65,61	100,00

Результати досліджень узагальнено в табл. 4.9. Як бачимо із табл. 4.9, на поверхні зразків із портландцементу в середньому переважають оксид кальцію *CaO* – 65,7 % та діоксид кремнію *SiO₂* – 20,1 %, кількість оксидів алюмінію *Al₂O₃* та заліза *Fe₂O₃* мінімальна – 3,94 і 3,08 %, що в цілому відповідає оксидному складу продуктів гідратації портландцементу, більшість з яких – портландит $\underline{Ca(OH)}_2$ (*CaO·H₂O*) та гідросилікати кальцію *C₂SH*, *CSH*. Оксидний склад продуктів гідратації на поверхні волокон також відповідає середньому оксидному складу продуктів гідратації портландцементу – 65,9, 19,2, 3,36, 2,27 %, відповідно. Проте на гладкій поверхні відбитку вміст *CaO* 82,8 % більший, а *SiO₂* 11,9 % менший порівняно з середнім складом продуктів гідратації портландцементу, отже, переважає портландит $\underline{Ca(OH)}_2$. Враховуючи гладку поверхню відбитку через адгезійний характер відриву волокна в цьому місці, на ньому мають

переважати продукти, які утворювались безпосередньо на поверхні волокна, отже, на цій поверхні зростали переважно кристали портландиту Ca(OH)_2 . Це відповідає припущеній на рис. 3.6, 3.7 структуру продуктів гідратації портландцементу на поверхні волокон та між ними.

Таблиця 4.8 – Інтегральний розподіл елементів і оксидів по поверхні частинок продуктів гідратації портландцементу на поверхні волокна (рис. 4.13). Атоми вуглецю (волокон) із аналізу виключені

Елемент	Умовна концентр ація	Інтенсив ність	Масовий %	Масовий % σ	Атомний %	Оксид	Мас. % оксиду	Число іонів
Спектр (частинка) 1								
Ca	144,51	0,9929	24,76	0,09	13,92	CaO	34,64	2,92
Al	174,59	0,8776	33,85	0,09	28,26	Al ₂ O ₃	63,95	5,93
Si	0,81	0,6286	0,22	0,04	0,18	SiO ₂	0,47	0,04
Fe	0,36	0,8233	0,08	0,05	0,03	Fe ₂ O ₃	0,11	0,01
Na	1,31	0,8207	0,27	0,04	0,27	Na ₂ O	0,36	0,06
Mg	0,82	0,7746	0,18	0,03	0,17	MgO	0,30	0,03
S	0,31	0,8110	0,07	0,03	0,05	SO ₃	0,16	0,01
O			40,58	0,10	57,14			12,00
Разом			100,00			Сума катіонів		9,00
Спектр (частинка) 2								
Ca	185,16	1,0045	31,29	0,09	18,09	CaO	43,78	3,85
Al	145,41	0,8578	28,77	0,09	24,72	Al ₂ O ₃	54,36	5,26
Si	0,57	0,6600	0,15	0,03	0,12	SiO ₂	0,31	0,03
Fe	0,88	0,8204	0,18	0,05	0,08	Fe ₂ O ₃	0,26	0,02
Na	1,15	0,7852	0,25	0,04	0,25	Na ₂ O	0,33	0,05
Mg	0,33	0,7478	0,07	0,03	0,07	MgO	0,12	0,02
S	1,64	0,8387	0,33	0,03	0,24	SO ₃	0,83	0,05
O								12,00
Разом			100,00			Сума катіонів		9,00
Спектр (частинка) 3								
Ca	167,91	0,9989	28,01	0,09	15,97	CaO	39,19	3,38
Al	162,54	0,8667	31,25	0,09	26,46	Al ₂ O ₃	59,04	5,60
Si	1,11	0,6441	0,29	0,03	0,23	SiO ₂	0,61	0,05
Fe	0,75	0,8219	0,15	0,05	0,06	Fe ₂ O ₃	0,22	0,01
Na	1,90	0,8030	0,39	0,04	0,39	Na ₂ O	0,53	0,08
Mg	0,47	0,7595	0,10	0,03	0,10	MgO	0,17	0,02
S	0,47	0,8240	0,10	0,03	0,07	SO ₃	0,24	0,01
O			39,71	0,10	56,72			12,00
Разом			100,00			Сума катіонів		9,00

Таблиця 4.9 – Інтегральний розподіл оксидів по поверхням відколів композиційного матеріалу із портландцементу, глиноземистого цементу та поліефірних волокон

Оксид	Вміст, мас. %, на поверхні відколу композиційного матеріалу із поліефірних волокон і:							
	портландцементу			глиноземистого цементу				
	всього відколу	продуктів на поверхні волокна	відбитку від волокна	всього відколу	частинки на волокні			
					1	2	3	сер
CaO	65,7	65,9	82,8	48,0	34,6	43,8	39,2	39,2
SiO_2	20,1	19,2	11,9	0,43	0,47	0,31	0,61	0,46
Al_2O_3	3,94	3,36	1,39	50,6	64,0	54,4	59,0	59,1
Fe_2O_3	3,08	2,27	0,81	0,31	0,11	0,26	0,22	0,20
M_o	2,42	2,66	5,87	0,93	0,54	0,80	0,65	0,66

На поверхні зразків із глиноземистого цементу в середньому переважають оксиди кальцію CaO – 48,0 % та алюмінію Al_2O_3 – 50,6 %, вміст SiO_2 і Fe_2O_3 мінімальний – 0,43 і 0,31 %, відповідно. В цілому це відповідає оксидному складу продуктів гідратації глиноземистого цементу, осниними з яких є гідроалюмінат кальцію C_3AH_6 і гідроксид алюмінію $Al(OH)_3$. На поверхні волокон кількість CaO 39,2 % менша, Al_2O_3 59,1 % – більша, ніж середня в зразках, отже, вміст $Al(OH)_3$ більший порівняно з середнім оксидним складом продуктів гідратації глиноземистого цементу. З урахуванням когезійного характеру відриву продуктів гідратації від волокна це дозволяє припустити, що на поверхні волокон наявні кристали C_3AH_6 , вкриті гелем гідроксиду алюмінію. Це відповідає припущеній на рис. 3.8, 3.9 структуру продуктів гідратації глиноземистого цементу на поверхні волокон та між ними.

4.2 Експериментальні дослідження композитів для прокладного шару

4.2.1 Фізико-механічні властивості композиції деревини та армованої гуми

Результати дослідження фізико-механічних властивостей композиції деревини та армованої гуми, виконані за методикою п. 2.6, наведено у табл. Б.1 і на рис. Б.1 додатку Б та узагальнено на рис. 4.14.

Із рис. 4.14 видно, що гумодерев'яний прокладний шар за рахунок деформації гуми зазнає значних деформацій і раптово крихко руйнується. Модуль його деформації та міцність на стиск складає для деревин сосни $E = 58,3$ МПа і $f = 5,5$ МПа, для деревини дубу – $E = 144,3$ МПа і $f = 7,9$ МПа. (табл. А.1).

Результати дослідження фізико-механічних властивостей композиції деревини та армованої гуми опубліковано у [101].

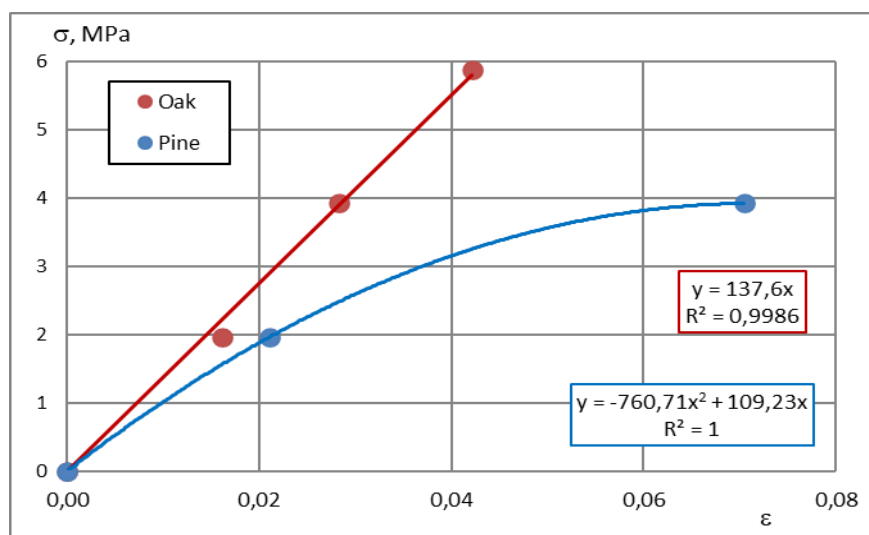


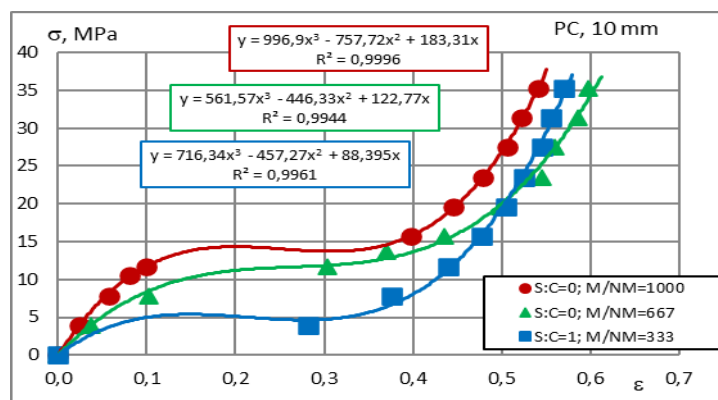
Рисунок 4.14 – Діаграми деформування (залежності між відносною деформацією ϵ і стискаючим напруженням σ) гумодерев'яної композиції з відношенням товщини армованої гуми до товщини деревини 1:5 із сосни (Pine) та дубу (Oak)

4.2.2 Фізико-механічні властивості композиційних матеріалів на основі цементів і НМОС

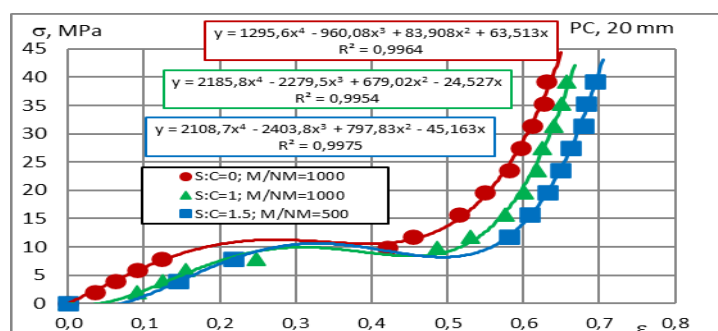
Результати дослідження фізико-механічних властивостей композиційних матеріалів на основі портландцементу, глиноземистого цементу і НМОС за оригінальною методикою, викладеною у п.2.5, наведено у табл. Б.2, Б.3 і на рис. Б.2–Б.24 додатку Б.

В результаті дослідження фізико-механічних властивостей композиційного матеріалу різного складу отримано діаграми деформування на стиск $\varepsilon = f(\sigma)$ та $\sigma = f(\varepsilon)$ (рис. А.2 –А.24). Під час випробування явного руйнування композиційного матеріалу з порушенням цілісності структури не спостерігалось – він поступово деформувався. У більшості зразків спостерігалась площадка текучості, більш чітка за більшого вмісту мінеральної суміші. Найбільш характерні діаграми $\sigma = f(\varepsilon)$ наведені на рис. 4.15.

а)



б)



в)

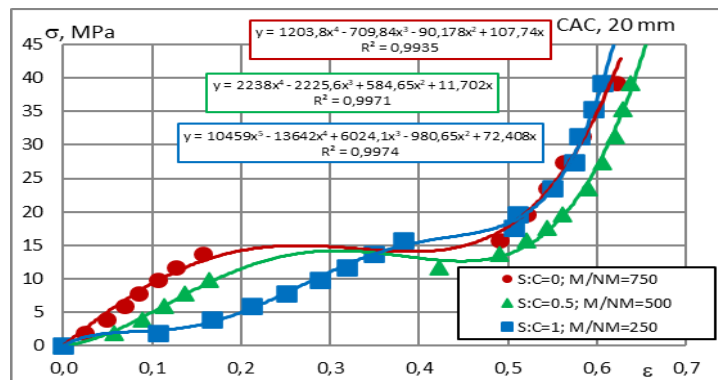


Рисунок 4.15 – Діаграми деформування (залежності між відносною деформацією ϵ і стискаючим напруженням σ) композиційного матеріалу на основі портландцементу (а, б) або кальційалюмінатного (глиноземистого) цементу (в) та нетканого матеріалу об'ємної структури товщиною 10 мм (а) і 20 мм (в, г) з різними масовим відношенням кількості піску до кількості цементу S:C та витратою мінеральної суміші на одиницю об'єму НМОС M/NM, кг/м³

Модуль його деформації (початковий модуль пружності) та міцність на стиск визначали за діаграмами руйнування рис. 4.15 згідно з п. 2.5.

4.2.3 Залежність модуля деформації композиту від співвідношення органічної та мінеральної складових в ньому

Побудовано діаграми залежності f і E від П:Ц і M/NM для різної товщини НМОС і різного виду цементу (рис. 4.16). Аналіз цих діаграм показав, що значення f та E збільшуються зі зменшенням товщини НМОС, зменшенням відношення вмісту піску до вмісту цементу S:C, збільшенням витрати мінеральної суміші на об'єм НМОС M/NM. У досліджених складів композиційного матеріалу максимальні значення сягнули: E – 163 МПа, f – 16 МПа (рис. 4.16, табл. 4.10).

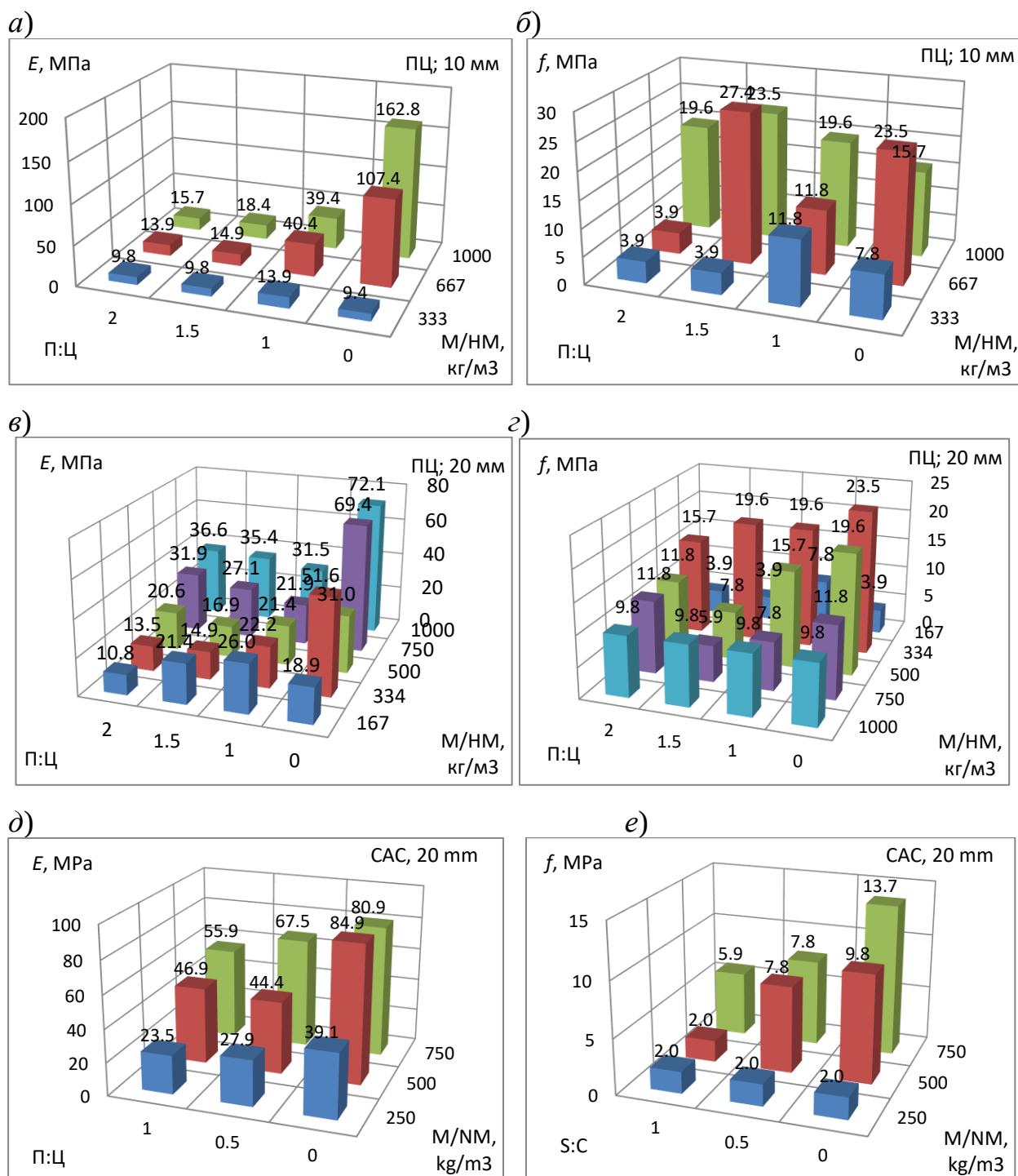


Рисунок 4.16 – Залежності початкового модуля пружності E (а, в, д) та міцності на стиск f (б, г, е) композиційного матеріалу на основі портландцементу (а, б, в, г), глиноземистого цементу (д, е) і НМОС товщиною 10 мм (а, б) і 20 мм (в, г, д, е) від масового відношення кількості піску до цементу П/Ц і витрати мінеральної суміші на 1 м³ НМОС М/НМ

Із рис. 4.16 видно, що модуль деформації та міцність на стиск композиційного матеріалу зменшуються зі збільшенням вмісту в мінеральній суміші піску П:Ц та зменшенням витрати мінеральної суміші на одиницю площі та об'єму НМОС М/НМ.

У таблиці 4.10 наведено значення модуля деформації E і міцності на стиск f гумодерев'яного композиту із сосни та дубу і композиційного матеріалу із портландцементу, глиноземистого цементу і НМОС складів, які забезпечують E і f не менші, ніж у гумодерев'яного композиту із сосни.

Для уточнення складів, що забезпечать деформативні характеристики, аналогічні гумодерев'яному прокладному шару, побудовано та апроксимовано графіки залежностей E від П:Ц (рис. 4.17).

Таблиця 4.10 – Порівняльні фізико-механічні характеристики гумодерев'яного композиту і композиційного матеріалу із портландцементу і НМОС

Матеріал				Початковий модуль пружності E , МПа	Міцність на стиск f , МПа
Гумодерев'яна композиція гума/деревина 1:5	Сосна			58,3	5,5
	Дуб			144,3	7,9
Композиційний матеріал із НМОС і портландцементу	δ , мм	П/Ц	М/НМ, кг/м ³		
	10	0	1000	162,8	15,7
	10	0	667	107,4	23,5
	20	0	750	69,4	11,8
	20	0	334	51,6	23,5
	10	1	667	40,4	11,8
те ж саме і глиноземистого цементу	20	0	500	84,9	9,8
	20	0	750	80,9	13,7
	20	0,5	750	67,5	7,8

Ці залежності добре апроксимуються з коефіцієнтами кореляції, близькими до 1, квадратним рівняннями, де $y = E$, $x = \text{П:Ц}$.

- для портландцементу і $M/HM = 1000 \text{ кг/м}^3$:

$$y = 48,62x^2 - 170,3x + 162,5; \quad (4.1)$$

- для портландцементу і $M/HM = 667 \text{ кг/м}^3$:

$$y = 22,86x^2 - 93,48x + 107,8; \quad (4.2)$$

- для глиноземистого цементу і $M/HM = 500 \text{ кг/м}^3$:

$$y = 85,93x^2 - 123,99x + 84,939; \quad (4.3)$$

- для глиноземистого цементу і $M/HM = 750 \text{ кг/м}^3$:

$$y = 3,5339x^2 - 28,494x + 80,862. \quad (4.4)$$

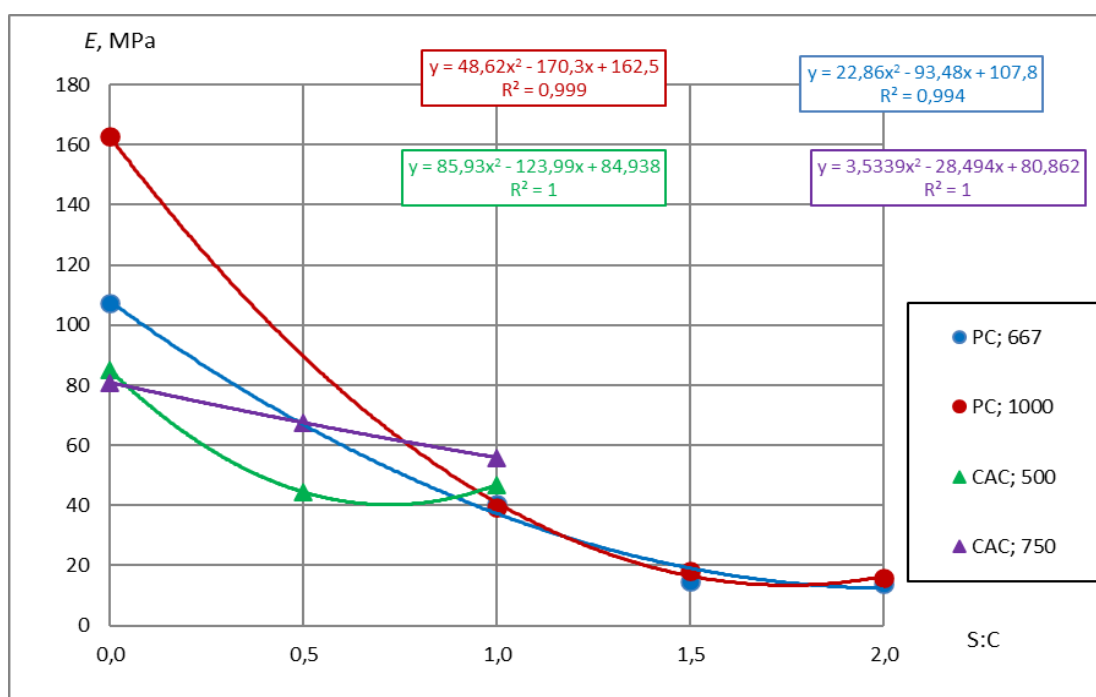


Рисунок 4.17 – Залежність модуля деформації E композиційного матеріалу на основі портландцементу РС і кальцієво-алюмінатного цементу САС та НМОС товщиною 10 мм (для РС) і 20 мм (для АС) з витратою мінеральної суміші M/HM 500, 667, 750, 1000 кг/м^3 від складу мінеральної суміші $S:C$

Із рис. 4.17 видно, що модуль деформації такий, як у гумодерев'яного композиту із дубу $E = 144,3 \text{ МПа}$ в граничних умовах застосовності

апроксимації може забезпечити лише залежність (4.1) для композиції на портландцементі, НМОН товщиною 10 мм і $M/HM = 1000 \text{ кг/м}^3$. Підставивши це значення у рівняння (4.1), отримаємо:

$$\begin{aligned} 144,3 &= 48,62x^2 - 170,3x + 162,5; \\ 48,62x^2 - 170,3x + 18,2 &= 0. \end{aligned} \quad (4.5)$$

В результаті розв'язання цього рівняння отримуємо значення x , які забезпечать $E = 144,3 \text{ МПа} - 3,39$ і $0,11$. Із цих значень граничним умовам відповідає значення $x = \Pi:\Pi = 0,11$.

Аналогічним чином знайдемо $x = \Pi:\Pi$, яке ця залежність забезпечить модуль деформації такий, як у гумодерев'яного композиту із сосни $E = 58,3 \text{ МПа}$:

$$\begin{aligned} 58,3 &= 48,62x^2 - 170,3x + 162,5; \\ 48,62x^2 - 170,3x + 104,2 &= 0. \end{aligned} \quad (4.6)$$

В результаті розв'язання цього рівняння отримуємо значення x , які забезпечать $E = 58,3 \text{ МПа} - 2,71$ і $0,79$. Із цих значень границям застосовності апроксимації відповідає значення $x = \Pi:\Pi = 0,79$.

Із рис. 4.17 видно, що модуль деформації такий, як у гумодерев'яного композиту із дубу $E = 144,3 \text{ МПа}$ в граничних умовах застосовності апроксимації рівняння (4.2), (4.3), (4.4) забезпечити не можуть. Вони забезпечують лише $E = 58,3 \text{ МПа}$. Винайдемо значення $x = \Pi:\Pi$, які його забезпечать:

- для портландцементу і $M/HM = 667 \text{ кг/м}^3$:

$$\begin{aligned} 58,3 &= 22,86x^2 - 93,48x + 107,8, \\ 22,86x^2 - 93,48x + 49,5 &= 0, \end{aligned} \quad (4.7)$$

значення x , які забезпечать $E = 58,3 \text{ МПа} - 3,47$ і $0,62$. Із цих значень граничним умовам відповідає значення $x = \Pi:\Pi = 0,62$;

- для глиноземистого цементу і $M/HM = 500 \text{ кг/м}^3$:

$$\begin{aligned}
 58,3 &= 85,93x^2 - 123,99x + 84,939, \\
 85,93x^2 - 123,99x + 26,639 &= 0,
 \end{aligned}
 \tag{4.8}$$

значення x , які забезпечать $E = 58,3$ МПа – 1,18 і 0,26. Із цих значень граничним умовам відповідає значення $x = \text{П:Ц} = 0,26$;

- для глиноземистого цементу і $\text{М/НМ} = 750 \text{ кг/м}^3$:

$$\begin{aligned}
 58,3 &= 3,5339x^2 - 28,494x + 80,862, \\
 3,5339x^2 - 28,494x + 22,562 &= 0.
 \end{aligned}
 \tag{4.9}$$

значення x , які забезпечать $E = 58,3$ МПа – 7,17 і 0,89. Із цих значень граничним умовам відповідає значення $x = \text{П:Ц} = 0,89$.

Уточнені таким чином склади рулонного композиційного матеріалу для прокладного шару наведені у табл. 4.11. Такі склади рекомендовано засовувати для прокладного шару між безбаластним мостовим полотном і металевими балками залізничних мостів.

Результати розробки складів рулонного композиційного матеріалу для прокладного шару та дослідження залежностей його фізико-механічних властивостей від складу опубліковано у [44, 101–103].

Таблиця 4.11 – Фізико-механічні характеристики гумодерев'яної композиції і рулонного композиційного матеріалу

Матеріал	Склад мінеральної суміші П:Ц	Модуль деформації E , МПа	Міцність на стиск f , МПа
Гумодерев'яна композиція (гума/деревина 1:5) із деревини дубу	-	144,3*	7,9*
Те ж саме із деревини сосни	-	58,3*	5,5*
Композиційний матеріал на основі портландцементу та НМОС товщиною 10 мм, витрата мінеральної суміші $\text{М/НМ} = 1000 \text{ кг/м}^3$	0	162,8*	15,7*
	0,11	144,3	12
	0,79	58,3	7
Те ж саме, $\text{М/НМ} = 667 \text{ кг/м}^3$	0,62	58,3	7
Композиційний матеріал на основі кальцієво-алюмінатного цементу та НМОС товщиною 20 мм, витрата мінеральної суміші $\text{М/НМ} = 500 \text{ кг/м}^3$	0	84,9*	9,8*
	0,26	58,3	7
Те ж саме $\text{М/НМ} = 750 \text{ кг/м}^3$	0,89	58,3	7

* Отримані експериментально величини

4.2.4 Гідрофізичні властивості композиційних матеріалів на основі цементів і НМОС

Гідрофізичні властивості дисперсно-армованих НМОС композиційних матеріалів на основі портландцементу та глиноземистого цементу – водопоглинання за масою та морозостійкість досліджено згідно з методикою п. 2.6. Результати дослідження наведено у додатку В. Водопоглинання за масою для матеріалу на портландцементі складає 1,45 %, на глиноземистому цементі – 3,49 %. Після 50 циклів заморожування та відтавання втрата маси зразків та видимі ознаки руйнування не спостерігались, навпаки – відзначалось збільшення маси на 0,8 і 1,2 %, відповідно. Збільшення маси може свідчити про певні зміни структури, що призводять до збільшення вмісту води, проте, оскільки воно не перевищує 2 %, констатуємо, що морозостійкість обох матеріалів є не меншою 8.

4.3 Строки тужавлення цементів і вплив добавок на них

Строки тужавлення обраних цементів, вплив добавок на них досліджено за методикою, викладеною у п. 2.8. Результати дослідження наведено у табл. 4.12 і на рис. 4.18.

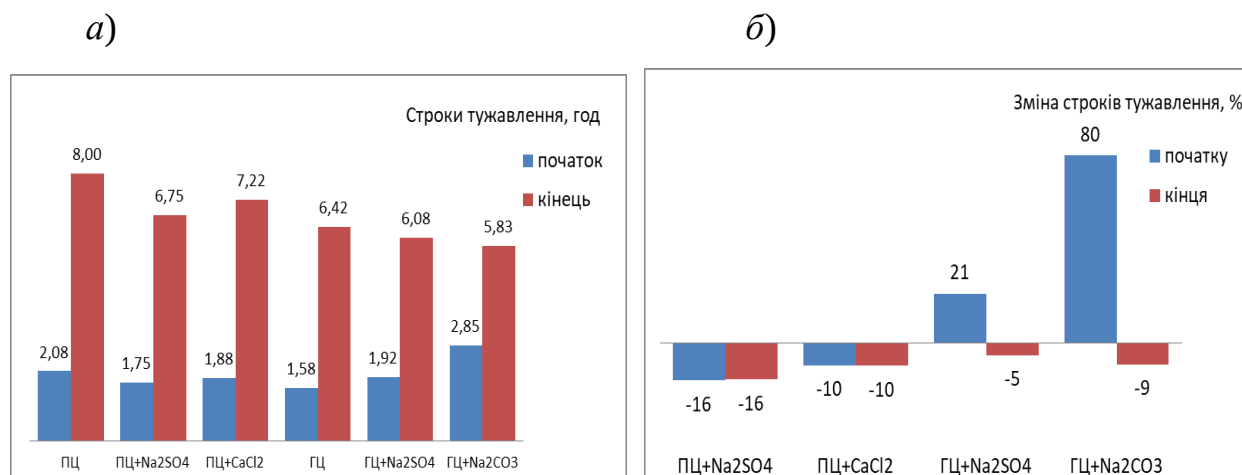


Рисунок 4.18 – Строки тужавлення портландцементу і глиноземистого цементу з добавками (а) та зміна строків тужавлення добавками (б)

Таблиця 4.12 – Результати дослідження строків тужавлення портландцементу і глиноземистого цементу і впливу добавок на них

Це-мент	Добавка	Вміст добав-ки, Д/Ц, %	Дозування, г			Норм альна гус-тота, %	Строки тужавлення							Вплив на строк тужавлення		
			Цемен-ту	Води	Добав ки		Початок				Кінець			початок	кінець	
							год	хв	год	год	хв	год				
ПЦ	б/д	0	400	116	0	0,290	2	20	2,33	2,08	8	15	8,25	8,00		
		0	400	117,5	0	0,294	1	50	1,83		7	45	7,75			
	Na ₂ SO ₄	1	400	118	4	0,295	1	20	1,33	1,75	6	20	6,33	6,75	скорочує на 16 %	скорочує на 16 %
		1	400	117,5	4	0,294	2	10	2,17		7	10	7,17			
	CaCl ₂	1	400	118	4	0,295	1	53	1,88	7	13	7,22	скорочує на 10 %	скорочує на 10 %		
ГЦ	б/д	0	400	113	0	0,283	1	35	1,58	6	25	6,42	скорочує порівняно з ПЦ на 24 %	скорочує порівняно з ПЦ на 20 %		
	Na ₂ SO ₄	1	400	113	4	0,283	1	55	1,92	6	5	6,08	подовжує на 21 %	скорочує на 5 %		
	Na ₂ CO ₃	1	400	113	4	0,283	2	51	2,85	5	50	5,83	подовжує на 80 %	скорочує на 9 %		
0,7ПЦ+0,2ГЦ+ +0,15(CaSO ₄ ×0,5H ₂ O) [49]			400	128		0,320	0	2	0,03	0	3	0,05	скорочує у 48 раз	скорочує у 128 раз		

Із табл. 4.12 видно, що тужавлення глиноземистого цементу досліджені хімічні добавки не прискорюють.

Тужавлення портландцементу прискорюють

- сульфат натрію Na_2SO_4 – на 16 %;

- хлорид кальцію $CaCl_2$ – на 10 %.

Висновки до розділу 4

1. Проведено оптико-мікроскопічні дослідження зрізів композиційного матеріалу із портландцементу, глиноземистого цементу і поліефірних волокон. Встановлено, що їх структура схожа, на зразках наявні ділянки добре ущільнені, на яких волокна у цементному камені майже не проглядаються, задовільно ущільнені, на яких проглядаються волокна, та незадовільно ущільнені з прошарками незаповненого цементним каменем волокнистого матеріалу. Наявність незадовільно ущільнених ділянок пов'язана з товщиною НМОС – у разі товщини 10 мм незадовільно ущільнені ділянки не спостерігались, максимальна кількість таких ділянок спостерігалась у зразках з товщиною НМОС 20 мм.

2. Проведено електронно-мікроскопічні дослідження відколів композиційного матеріалу із портландцементу, глиноземистого цементу і поліефірних волокон. Встановлено, що їх мікроструктура схожа, у більшості волокон близько половини поверхні волокон вкрита продуктами гідратації. Волокна, майже вся поверхня яких щільно вкрита продуктами гідратації, зустрічаються лише у зразках на глиноземистому цементі, а волокна без продуктів гідратації та відбитки від волокон з гладкою поверхнею зустрічаються лише у зразках із портландцементу, що свідчить про краще зчеплення з поверхнею волокон продуктів гідратації глиноземистого цементу. В усіх зразках на поверхні волокон наявні кристали розміром декілька мкм, а також дрібніші гелеподібні утворення. У зразках із портландцементу наявні ізометричні кристали, а також окремі гексагональні пластини портландиту $Ca(OH)_2$, а серед гелеподібних утворень наявні волокнуваті кристали гідросилікатів кальцію розміром менше 1 мкм. У зразках із глиноземистого цементу наявні ізометричні та кубічні кристали гідроалюмінатів кальцію C_3AH_6 , а також аморфна маса гідроксиду алюмінію $Al(OH)_3$. Безпосередньо на поверхні волокон спостерігаються переважно кристали.

3. Проведено мікрорентгенівський аналіз відколів композиційного матеріалу із портландцементу, глиноземистого цементу і поліефірних волокон. Встановлено, що в матеріалі із портландцементу на поверхні відбитку від волокна на продуктах гідратації, відрив яких мав адгезійний характер, вміст CaO 82,8 % більший, а SiO_2 11,9 % менший порівняно з їх вмістом у середньому оксидному складі продуктів гідратації портландцементу 65,7 і 20,1 %, відповідно. Отже, на поверхні волокна зростають переважно кристали портландиту $\text{Ca}(\text{OH})_2$. В матеріалі з глиноземистого цементу на поверхні волокон, відрив від яких продуктів гідратації мав когезійний характер, вміст CaO 39,2 % менший, а Al_2O_3 59,1 % більший порівняно з їх вмістом у середньому оксидному складу продуктів гідратації 48 і 50,6 %, відповідно. Враховуючи результати електронної мікроскопії очевидно, що на поверхні волокон наявні кристали гідро алюмінату кальцію C_3AH_6 , вкриті гелем гідроксиду алюмінію $\text{Al}(\text{OH})_3$.

4. Визначено величину модуля деформації і міцності на стиск гумодерев'яного прокладного шару. Такий прокладний шар зазнає значних деформацій за рахунок гуми і раптово крихко руйнується. Модуль деформації складає 58,3 МПа для сосни і 144 МПа для дубу.

5. Досліджено залежності модуля деформації та міцності на стиск прокладного шару із рулонного композиційного матеріалу від відношення кількості піску до кількості цементу в мінеральній суміші П/Ц, витрати мінеральної суміші на одиницю об'єму НМОС М/НМ, товщини НМОС.

6. Встановлено, що модуль деформації та умовна міцність на стиск композиційного матеріалу зменшуються зі збільшенням вмісту в мінеральній суміші піску П:Ц та зменшенням витрати мінеральної суміші на одиницю площі та об'єму НМОС М/НМ. Прокладний шар із рулонного композиційного матеріалу має модуль деформації 144 МПа за П/Ц не більше 0,11, М/НМ 1000 кг/м^3 . Такі склади рекомендовано засовувати для прокладного шару, спосіб улаштування якого запатентовано.

РОЗДІЛ 5

ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

5.1 Розроблення технології укладання залізобетонного безбаластного мостового полотна на прокладний шар із розробленого композиту

Розроблено конструктивно-технологічне рішення прокладного шару із запропонованого композиційного матеріалу. Це рішення відноситься до технологій композиційних матеріалів і може бути використана у будівельній галузі залізничних мостів та інших штучних споруд мостового типу.

На металевих залізничних мостах рейкова колія укладається на безбаластне мостове полотно із залізобетонних плит (рис. 1.2). Сполучення залізобетонних плит безбаластного мостового полотна 1 (рис. 1.2) зі сталевими подовжніми балками мосту 2 здійснюється через прокладний шар 3.

В УкрДУЗТ було розроблено спосіб улаштування прокладного шару між подовжніми сталевими балками залізничного мосту 1 (рис. 1.3) [35] і залізобетонними плитами безбаластного мостового полотна 2, який передбачає встановлення на верхню полицю балок локальних опор 3 висотою, що відповідає проєктній товщині прокладного шару (через нерівності та деформації конструкцій мосту коливається по його довжині в межах від 10 до 80 мм), а по її краям – опалубки 4, встановлення плит 2 на локальні опори 3 і заливання в утворену порожнину між верхньою полицею балки, опалубкою і нижньою гранню плити через технологічні отвори у плиті 5 рухомої суміші 6 на основі мінерального в'язучого та/або полімеру. В результаті твердіння суміші утворюється прокладний шар, що характеризується високою міцністю та довговічністю – термін його служби складає не менше 30 років. Проте в місцях, де проєктна товщина прокладного

шару менше ніж 20–30 мм, спосіб не забезпечує рівномірного заповнення сумішшю зазначеної порожнини та рівномірне обпирання плити на подовжню балку, що у близько 14 % плит обумовлює утворення тріщин під час експлуатації та, відповідно, їх передчасний вихід із експлуатації (рис. 1.4) [12, 16]. Отже, лише 86 % нового прокладного шару, улаштованого цим способом, можна вважати бездефектним (табл. 5.1).

Таблиця 5.1 – Порівняльні характеристики прокладного шару та безбаластного мостового полотна на ньому, улаштованими із застосуванням конструктивно-технологічних рішень [35], [7] і розробленим

Спосіб улаштування прокладного шару	Відсоток довжини прокладного шару без дефектів, %	Довговічність (міжремонтний термін) бездефектної частини прокладного шару, років
Заливання та твердіння рухомої суміші на основі мінерального в'язучого та/або полімеру [35]	86	30
Заготівля та укладання гумодерев'яного шару [7]	100	10–15
Заготівля, укладання та твердіння рулонного композиційного матеріалу (розроблене конструктивно-технологічне рішення)	100	30

Розроблюване конструктивно-технологічне рішення в більшому ступені ґрунтується на традиційному способі улаштування прокладного шару між сталевими балками залізничного мосту 1 (рис. 1.2, в) [7] і залізобетонними плитами безбаластного мостового полотна 2, який полягає у заготівлі прокладного шару – нарізанні дощок із деревини 3 і смуг із армованої гуми 4 сумарною товщиною, що відповідає проєктній товщині прокладного шару, і укладанні на верхню полицю сталевих балок перед укладанням плит спочатку дощок 3, а зверху – армованої гуми 4, або тільки

армованої гуми. Цей спосіб забезпечує більш рівномірне обпирання плит на подовжню балку, проте не забезпечує довговічності прокладного шару і мостового полотна в цілому [12]. Внаслідок гниття під впливом дереворуйнівних грибів деревина втрачає фізико-механічні властивості, що обумовлює нерівномірне осідання плит, утворення у них тріщин, розлад залізничної колії у плані та профілі, та вимагає заміни через 10–15 років експлуатації (табл. 3.1).

Конструктивно-технологічне рішення [7] удосконалене з метою зменшення первинної дефектності прокладного шару, збільшення довговічності прокладного шару та мостового полотна в цілому. Ця мета досягнута за рахунок того, що прокладний шар попередньо виготовляють у вигляді рулонів із нетканого матеріалу об'ємної структури, цементу, дрібного заповнювача і добавок-прискорювачів твердіння (рис. 5.1), на верхню полицю балок 1 (рис. 5.2) встановлюють локальні опори 3 висотою, рівною проєктній товщині прокладного шару, рулонний матеріал просочують водою, розкочують, укладають в декілька шарів 4 загальною товщиною на 5–30 % більшою проєктної товщини прокладного шару та ущільнюють вагою плит безбаластного мостового полотна шляхом їх укладання в проєктне положення.



Рисунок 5.1 – Заготівля рулонного композиційного матеріалу для прокладного шару

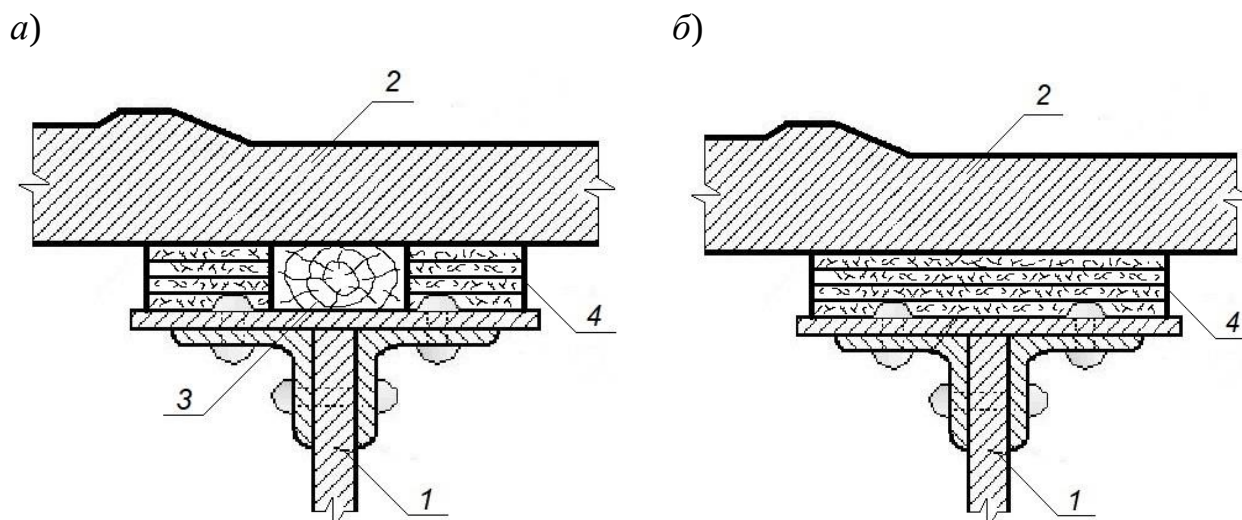


Рисунок 5.2 – Схема улаштування прокладного шару із рулонного композиційного матеріалу в місцях: *а* – встановлення локальної опори; *б* – поза місць встановлення локальних опор

В результаті отриманий за розробленим конструктивно-технологічним рішенням прокладний шар характеризується первинною бездефектністю та довговічністю, притаманною матеріалам на основі мінеральних в'язучих речовин, не менше 30 років (табл. 5.1).

На розроблене конструктивно-технологічне рішення отримано патент на корисну модель [104] та подано заявку на винахід [105] (додаток Г) з наступною формулою:

Спосіб улаштування прокладного шару між сталевими балками залізничного мосту і залізобетонними плитами безбаластного мостового полотна, який полягає в заготівлі та укладанні прокладного шару на верхню полицю сталевих балок перед укладанням плит, який відрізняється тим, що прокладний шар попередньо виготовляють у вигляді рулонів із нетканого матеріалу об'ємної структури, цементу, дрібного заповнювача і добавок-прискорювачів твердіння, на верхню полицю балок встановлюють локальні опори висотою, рівною проєктній товщині прокладного шару, рулонний матеріал просочують водою, розкочують, укладають в декілька шарів

загальною товщиною на 5–30 % більшою проектною товщиною прокладного шару та ущільнюють вагою плит безбаластного мостового полотна шляхом їх укладання в проектне положення.

5.2 Розроблення технології ремонту безбаластного мостового полотна із заміною прокладного шару без знімання плит

Розроблено конструктивно-технологічне рішення ремонту безбаластного мостового полотна із заміною прокладного шару запропонованим композиційним матеріалом без знімання плит. Це рішення відноситься до технологій ремонту залізничних штучних споруд, зокрема металевих мостів і шляхопроводів, і може бути використаний у галузі експлуатації штучних споруд, зокрема залізничних металевих мостів і шляхопроводів.

На залізничних металевих мостах і шляхопроводах рейкова колія укладається на безбаластне мостове полотно із залізобетонних плит (рис. 1.2) [6, 7]. Сполучення залізобетонних плит безбаластного мостового полотна 1 (рис. 1.2) зі сталевими подовжніми балками мосту 2 здійснюється через прокладний шар 3. Прокладний шар влаштовують двошаровим (рис. 1.2 б) із дерев'яних дощок 4 (рис. 1.2, б) і армованої гуми 5 або в окремих місцях – одношаровим тільки із армованої гуми. Проте внаслідок біологічного пошкодження дерева швидко втрачає фізико-механічні властивості та руйнується, що обумовлює термін служби прокладного шару 10–15 років отже, менший, ніж залізобетонних плит 20–40 років [10], що вимагає здійснювати ремонт безбаластного мостового полотна кожні 10–15 років.

У п. 5.1 розроблено спосіб улаштування прокладного шару між сталевими балками залізничного мосту і залізобетонними плитами безбаластного мостового полотна під час будівництва мостового полотна, який полягає в заготівлі рулонів із нетканого матеріалу об'ємної структури,

цементу, дрібного заповнювача і добавок-прискорювачів твердіння, встановленні на верхню полицю балок локальних опор висотою, рівною проектній товщині прокладного шару, просоченні рулонного матеріалу водою, його розкочуванні, укладанні в декілька шарів загальною товщиною на 30–60 % більшою проектною товщини прокладного шару та ущільненні вагою плит шляхом їх укладання в проектне положення.

Традиційний спосіб ремонту безбаластного мостового полотна залізничних мостів із залізобетонних плит [7] полягає у його повній заміні, а, отже, заготівлі на промисловій базі матеріалів нового прокладного шару – нарізанні дощок із деревини та смуг із армованої гуми, заготівлі нових рейок і плит (збиранні з них ланок), зняття з подовжніх балок моста колієукладальним консольним краном рейок і плит (ланок), їх вивезенні з моста і перегону на базу, зняття пошкодженого прокладного шару, очищенні та фарбуванні поверхні балок вручну, укладанні нових дерев'яних дощок 8, рис. 1, в) і смуг із армованої гуми 9, привезенні і укладанні заготовлених рейок і плит (ланок) колієукладальним краном. Роботи виконуються з припиненням руху поїздів (у «вікно»), тривалість «вікна» залежить від довжини мостового полотна і для довжини 25 м складає 6 годин [6]. Враховуючи повну заміну усіх конструкцій безбаластного мостового полотна як міжремонтний період, так і його фактична довговічність в цілому складають 10-15 років.

Існує спосіб ремонту безбаластного мостового полотна (п.1.1 табл. 6 [10]), який полягає у заміні тільки прокладного шару а, отже, заготівлі на промисловій базі матеріалів нового прокладного шару – нарізанні дощок із деревини і смуг із армованої гуми 9 (рис .1.2), відкріпленні рейок від плит на довжині 25 м в обидва боки від плити, відкріпленні плити від балок, підняття плити домкратом на висоту 200–300 мм, зняття пошкодженого прокладного шару, очищенні та фарбуванні поверхні балок вручну, укладанню заготовлених дощок 8 і гумових смуг 9, опусканні плити в проектне

положення, прикріпленні плити до балок і рейок до плит. Роботи виконуються у «вікно», тривалість якого, якщо із графіку робіт (додаток Д [6]) виключити повне зняття та укладання рейок та плит, для довжини 25 м складає 3 години. Через термін служби гумодерев'яного прокладного шару 10–15 років міжремонтний період для безбаластного мостового полотна складає 10–15 років. Проте враховуючи те, що плити і рейки залишаються на місці, довговічність мостового полотна в цілому відповідає довговічності плит і складає 20–40 років.

Саме це конструктивно-технологічне рішення удосконалене з метою зменшення тривалості «вікон» на ремонт безбаластного мостового полотна, збільшення міжремонтного періоду та підвищення довговічності безбаластного мостового полотна.

Ця мета досягнута за рахунок того, що попередньо заготовляють швидкотверднучий рулонний композиційний матеріал із нетканого матеріалу об'ємної структури, глиноземистого цементу та дрібного заповнювача, добавки-інгібітора корозії сталі (рис. 5.1), пошкоджений прокладний шар під плитою видаляють за допомогою механізованого інструменту без відкріплення рейок від плит і плит від балок та без їх підняття, рулонний композиційний матеріал просочують водою, розкочують та щільно пошарово набивають у зазор між плитою та балкою, забезпечуючи його обтиснення на 20–40 % висоти, матеріал твердіє і утворює композиційний прокладний шар 4 (рис. 5.2, б), термін служби якого відповідає терміну служби плит 20–40 років. Роботи виконуються без припинення руху поїздів (лише зі зниженням швидкості їх руху). Термін служби композиційного прокладного шару є не меншим, ніж довговічність плит, отже, 20–40 років, тому залишковий міжремонтний період складає 10–25 років, а довговічність мостового полотна в цілому дорівнює довговічності плит і складає 20–40 років.

На розроблене конструктивно-технологічне рішення отримано патент на корисну модель [106] та подано заявку на винахід [107] (додаток Г) з наступною формулою:

Спосіб ремонту безбаластного мостового полотна залізничних мостів із залізобетонних плит, який полягає в заготівлі швидкотверднучого рулонного композиційного матеріалу для прокладного шару із нетканого матеріалу об'ємної структури, мінеральної в'язучої речовини та дрібного заповнювача, його просоченні водою, розкочуванні та поміщенні на балки мосту, який відрізняється тим, що як мінеральну в'язучу речовину беруть швидкотверднучий глиноземистий цемент, у композиційний матеріал додають добавку-інгібітор корозії сталі, пошкоджений прокладний шар під плитою видаляють за допомогою механізованого інструменту без відкріплення рейок від плит і плит від балок та без їх підняття, рулонний композиційний матеріал щільно пошарово набивають у зазор між плитою та балкою, забезпечуючи його обтиснення на 20-40 % висоти.

На запропоноване конструктивно-технологічне рішення розроблено Технологічний регламент ремонту безбаластного мостового полотна із залізобетонних плит з частковою заміною прокладного шару швидкотверднучим рулонним композиційним матеріалом, наведений у додатку Д.

5.3 Оцінка соціально-економічної ефективності

Застосування запропонованого конструктивно-технологічного рішення ремонту безбаластного мостового полотна із залізобетонних плит з частковою заміною прокладного шару швидкотверднучим рулонним композиційним матеріалом дозволяє скоротити з 6 годин до 0 тривалість «вікон» на ремонт безбаластного мостового полотна, збільшити подальший

середній міжремонтний періоду з 12,5 до 17,5 років та середню довговічність з 12,5 до 30 років (табл. 5.2).

Акти впровадження результатів в досліджень наведено у додатку Е.

Таблиця 5.2 – Порівняльні характеристики способів ремонту безбаластного мостового полотна за [6, 7, 10] і згідно з розробленим конструктивно-технологічним рішенням

Спосіб ремонту безбаластного мостового полотна	Тривалість «вікон», годин	Міжремонтний період безбаластного мостового полотна, років	Довговічність безбаластного мостового полотна в цілому, років
Повна заміна рейок, плит і прокладного шару за допомогою консольного колісукладального крану [6, 7]	6	10–15, в середньому 12,5	10–15, в середньому 12,5
Заміна гумодерев'яного прокладного шару з відкріпленням і підняттям рейок і плит домкратом [7, 10]	3	10–15, в середньому 12,5	20–40, в середньому 30
Заміна гумодерев'яного прокладного шару тверднучим рулонним композиційним матеріалом без відкріплення та підняття рейок і плит домкратом (розроблене конструктивно-технологічне рішення)	0	10–25, в середньому 17,5	20–40, в середньому 30

5.4 Використання результатів досліджень у навчальному процесі

Результати дисертаційного дослідження використано у навчальному процесі УкрДУЗТ з підготування:

- бакалаврів і магістрів – за спеціальністю 192 Будівництво та цивільна інженерія, освітньою програмою «Промислове та цивільне будівництво» і 273 Залізничний транспорт, освітньою програмою «Залізничні споруди та колійне господарство» у складі лекційних курсів, практичних занять, лабораторних робіт з дисциплін:

«Улаштування, експлуатація і реконструкція інженерних споруд»,
«Відновлення експлуатаційних властивостей і захист конструкцій і споруд»;

- докторів філософії – за спеціальностями 192 Будівництво та цивільна інженерія і 273 Залізничний транспорт у складі лекційних курсів і практичних занять з дисциплін:

«Модифікація бетонів і будівельних розчинів хімічними, мінеральними добавками та полімерами»,

«Сучасні технічні рішення щодо підвищення надійності елементів залізничної колії».

Акт впровадження результатів досліджень у навчальний процес наведено у додатку Е.

Висновки до розділу 5

1. Розроблено та запатентовано конструктивно-технологічне рішення прокладного шару із рулонного композиційного матеріалу, що складається із нетканого матеріалу об'ємної структури НМОС із анізотрично орієнтованих поліефірних волокон, цементу, дрібного заповнювача піску і добавок-прискорювачів твердіння.

2. Розроблено, запатентовано та впроваджено конструктивно-технологічне рішення ремонту безбаластного мостового полотна із залізобетонних плит з частковою заміною прокладного шару швидкотверднучим рулонним композиційним матеріалом. Соціально-економічна ефективність впровадження цього рішення забезпечена збільшенням міжремонтного періоду для безбаластного мостового полотна в середньому з 12,5 до 17,5 років, отже, на 40 %, підвищенням довговічності безбаластного мостового полотна з 12,5 до 30 років, отже, у 2,45 рази,

проведенням ремонтних робіт без припинення руху поїздів замість ремонту у «вікна» тривалістю 6 годин.

3. Результати дисертаційного дослідження впроваджено у навчальний процес з підготовки бакалаврів, магістрів, докторів філософії за спеціальностями 192 Будівництво та цивільна інженерія і 273 Залізничний транспорт.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Встановлено, що традиційний гумодерев'яний прокладний шар має недостатню довговічність через гниття деревини. В результаті аналізу напружено-деформованого стану мостового полотна та з урахуванням технології його укладання встановлено, що міцність матеріалу прокладного шару через 6–8 годин після укладання має бути не меншою 1 МПа, у віці 2 доби та більше – не меншою 5 МПа, модуль деформації має бути не більшим ніж 2000 МПа. Показано, що такий матеріал може бути створений із портландцементу з добавками прискорювачами твердіння, глиноземистого цементу, нетканого матеріалу об'ємної структури із поліефірних волокон.

2. В результаті аналізу хімічного складу, структури, технології отримання поліефірних волокон встановлено, що на їх поверхні з урахуванням силіконових змашувачів у середовищі тверднучих цементів наявна певна кількість гідроксильних груп $-OH$ та карбоксильних груп COO^- , які є негативно зарядженими активними поверхневими центрами, здатними утворювати електрогетерогенні контакти з частинками продуктів гідратації цементів, що мають позитивний поверхневий заряд.

3. Розрахунком встановлено, що рівноважний електроповерхневий потенціал кристалічного гідроалюмінату кальцію C_3AH_6 за $pH = 11,5$ складає $+0,225$ В, гелю гідроксиду алюмінію $Al(OH)_3$ – мінус $0,354$ В, отже, в середовищі порового електроліту тверднучого глиноземистого цементу вони

мають, відповідно, позитивний та негативний поверхневі заряди і утворюють між собою електрогетерогенні контакти. Електрогетерогенні контакти з негативно зарядженими активними поверхневими центрами на поліефірному волокні утворюють кристали C_3AH_6 , з поверхнями заповнювача – гелю гідроксиду алюмінію $Al(OH)_3$. Аналіз кристалічної будови C_3AH_6 і $Al(OH)_3$ показав, що потенціалвизначальними іонами їх поверхні є, відповідно, катіон кальцію Ca^{2+} та гідроксил-іон OH^- .

4. Розроблено схеми електрогетерогенних контактів, які забезпечують фізико-механічні властивості дисперсно-армованих поліефірним волокном композитів: із портландцементу – між поверхнею волокна і кристалогідратами портландиту $Ca(OH)_2$, між кристалогідратами портландиту $Ca(OH)_2$ і частинками гідросилікатного гелю; із глиноземистого цементу – між поверхнею волокна і кристалогідратами C_3AH_6 , між кристалогідратами C_3AH_6 і гелем гідроксиду алюмінію $Al(OH)_3$. Розрахунками встановлено, що зусилля розриву одиничного електрогетерогенного контакту залежить від кількості шарів молекул H_2O в ньому. За відсутності H_2O зусилля розриву забезпечується безпосередньою іон-іонною взаємодією Ca^{2+} і OH^- і є максимальним, за одного ряду H_2O визначається іон-дипольною взаємодією Ca^{2+} і H_2O і складає 0,31 від максимального, за двох та більше рядів H_2O визначається послідовною диполь-дипольною взаємодією між H_2O і складає 0,12 та менше від максимального.

5. В результаті електронно-мікроскопічних досліджень з мікрорентгенівським аналізом встановлено, що у композиційному матеріалі із портландцементу безпосередньо на поверхні волокон спостерігаються переважно кристали портландиту $Ca(OH)_2$, а гелеподібні утворення між ними є гідросилікатами кальцію. У матеріалі із глиноземистого цементу структура продуктів гідратації безпосередньо на поверхні волокна дещо щільніша,

серед них переважають кристали гідроалюмінату кальцію C_3AH_6 , між якими спостерігаються аморфні утворення гідроксиду алюмінію $Al(OH)_3$.

6. Експериментально встановлено, що інтегральний модуль деформації гумодерев'яної композиції прокладного шару складає 58 МПа для сосни і 144 МПа для дубу. Вона зазнає значних деформацій за рахунок гуми і раптово крихко руйнується.

7 Експериментально встановлено, що композиційний матеріал також зазнає значних деформацій, проте руйнування з порушенням структурної цілісності не спостерігається. Його модуль деформації та умовна міцність на стиск зменшуються зі збільшенням вмісту в мінеральній суміші заповнювача та зменшенням витрати мінеральної суміші на одиницю площі нетканого матеріалу. Матеріал має модулі деформації, відповідні гумодерев'яній композиції за вмісту піску не більше 0,1 і витратою мінеральної суміші на 1 м² нетканого матеріалу не менше 10 кг.

8. Розроблено, запатентовано та впроваджено конструктивно-технологічні рішення прокладного шару із розробленого рулонного композиційного матеріалу, а також ремонту безбаластного мостового полотна із залізобетонних плит з частковою заміною прокладного шару швидкотверднучим рулонним композиційним матеріалом. Соціально-економічна ефективність впровадження цього рішення забезпечена збільшенням міжремонтного періоду для безбаластного мостового полотна на 40 %, підвищенням його довговічності у 2,45 рази, проведенням ремонтних робіт без припинення руху поїздів замість ремонту у «вікна». Результати досліджень впроваджені у навчальний процес.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- 1 Федоренко Ю.В., Сопов В.П. Технологія модульного будівельного рішення SPEEDSTAC для відновлення зруйнованого житла в Україні. Науковий вісник будівництва. Харків: ХНУБА, ХОТВ АБУ. 2022. Т. 108. №2. С. 44-49. <https://doi.org/10.29295/2311-7257-2022-108-2-44-49>
2. LB.ua. Дорослий погляд на світ. <https://i.lb.ua/027/55/54992e30a8e95.jpeg>
3. Malyn.media. Весь діловий та активний Малин. <https://malyn.media/wp-content/uploads/2022/04/zaliznychnyy-mist-cherez-Irpin-2.jpg>
4. Ugnenko E., Shevchenko A., Shevchenko O. Stages of reconstruction and renewal of Ukraine's infrastructure in the war and post-war period, taking into account experience and security *Environmental Engineering (Lithuania)* (2023) 848. <https://doi.org/10.3846/enviro.2023.848>
5. Ugnenko E., Shevchenko, A., Matviienko O., Viselga G., Turla V. Analysis of Existing Train Lines and International Railway Transport Corridors of Ukraine *Lecture Notes in Intelligent Transportation and Infrastructure* F1380 (2020) 622–632. https://doi.org/10.1007/978-3-030-38666-5_65
6. Інженерні споруди. Мостове полотно залізничних мостів. Правила улаштування і конструкція. СТП 06-008:2021 АТ «Укрзаліниця»
7. Інструкція з укладання та експлуатації безбаластного мостового полотна (БМП) на залізобетонних плитах (ЦП-0137). А.М.Плугін, С.В.Мірошніченко, О.А.Калінін, А.В.Никитинський. Затверджена наказом Укрзалізниці № 682-ЦЗ від 07.12.2005. Київ (2006) 100 с.
8. Линник Г. О. Утримання штучних споруд на залізницях України *Дорожня галузь України* 1 (2007) 31-32.

9. Линник Г.О. Дослідження конструктивних особливостей мостового полотна на безбалластних мостових плитах. *Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів та конструкцій* 8 (2009) 685-690.

10. ДСТУ 9002:2020 Споруди транспорту. Класифікація, періодичність призначення та проведення планово-запобіжних ремонтів залізничних колій

11. Корниенко И.Г., Мирошніченко С.В. Плиты безбалластного мостового полотна: Проблемы и новое направления развития. *Зб. наук. праць УкрДАЗТ* 129 (2012) 178–183.

12. Пługін А.А., Забіяка О.А., Мірошніченко С.В., Линник Г.О., Бабенко А.І. Систематизація пошкоджень залізобетонних плит безбалластного полотна залізничних мостів. *Зб. наук. праць УкрДАЗТ* 109 (2009) 120-131.

13. Мірошніченко С.В. Дослідження напруг і деформацій у плитах безбалластного мостового полотна. *Зб. наук. праць УкрДАЗТ* 109 (2009) 113-119.

14. Пługин А.Н., Пługин А.А., Корниенко И.Г., Мирошніченко С.В. К вопросу исследования трещиностойкости железобетонных плит безбалластного мостового полотна. *Збірник наукових праць НДІБК «Сучасні технології бетону»* (2010) 457–464.

15. Plugin A., Miroshnichenko S., Zabiyaka A., Linnik G. Increase of crack-stability of plates of without-ballast bridge bed of railway bridges. *7th International Conference on Bridges across the Danube, Sofia, Bulgaria* (2010) 307–310.

16. Пługін А.А., Мірошніченко С.В., Лобяк О.В., Забіяка О.А., Линник Г.О., Шуба Т. Аналіз напружено-деформованого стану плит безбалластного мостового полотна і прокладного шару під ними. *Зб. наук. праць УкрДАЗТ* 148 (2014) 104–110.

17. Линник Г. О. Дослідження несної здатності прогонових будов металевих мостів з різними типами мостового полотна *Дороги і мости* 9 (2008) 141-144.

18. Закора О.Л., Линник Г.О., Марочка В.В. Експериментальні дослідження несучої здатності повздовжніх металевих балок залежно від типу мостового полотна. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Теорія і практика будівництва* 662 (2010) 193-195.

19. Закора О.Л., Линник Г.О., Марочка В.В. Дослідження роботи стінки поздовжньої балки залізничних металевих мостів при різних типах мостового полотна *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. В. Лазаряна* 33 (2010) 88-92.

20. Плугін А.А., Мірошніченко С.В., Калінін О.А., Партала Н.М., Нестеренко С.Г., Перестюк В.В., Никитенко А.В. Цементні та полімерцементні дрібнозернисті бетони для прокладного шару безбаластного мостового полотна із залізобетонних плит *Зб. наук. праць УкрДАЗТ* 148 (2) (2014) 39-45.

21. Линник Г.О. Дослідження місцевих деформацій бетонного прокладного шару при використанні мостового полотна на плитах БМП *Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Теорія і практика будівництва* 662 (2010) 293-295.

22. Толмачов Д.С., Толмачов С.М. Структуроутворення та внутрішні напруження в монолітному цементобетоні, що твердіє. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*. Луцьк, ЛНТУ. 2024, Випуск 21. С. 244-252. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2024-11\(21\)-26](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2024-11(21)-26)

23. Толмачов С.М., Толмачов Д.С. Розрахункове призначення відстані між швами розширення цементобетонних покриттів доріг. *Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету*.- т.1, №105, 2004.- с.92 – 96. <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2024.105.0.92>

24. Плугин А.Н., Плугин А.А., Кудренко С.Н., Калинин О.А., Мирошніченко С.В., Трикоз Л.В., Никитинский А.В., Лютый В.А. Долговременная ползучесть бетона и напряженно-деформированное

состояние железобетонных изделий и конструкций *Збірник наукових праць УкрДАЗТ* 63 (2004) 5–47.

25. Sergiy Tolmachov, Dmytro Tolmachov Properties of monolithic cement concrete, hardening at temperatures close to zero. *ЖТБП*. 2024; Volume 6, Number 2: 102-110. <https://doi.org/10.23939/jtbp2024.02.102>

26. Плугин А.Н., Плугин А.А., Плугин Д.А., Трикоз Л.В., Плугин Ал.А. Исследование и обнаружение новых особосложных условий эксплуатации сооружений и конструкций за счет избыточных зарядов на поверхности Земли *Залізничний транспорт України* 2 (2014) 17–26.

27. Плугин А.Н., Трикоз Л.В., Плугин А.А., Плугин Д.А., Конев А.А., Борзяк О.С. Новые движущие силы и причины разрушений материалов, конструкций и сооружений *Збірник наукових праць УкрДАЗТ* 148(2) (2014) 5–20.

28. Плуґін А.М., Плуґін А.А., Скорик О.О., Герасименко О.С., Трикоз Л.В., Макеев М.Ф. Електрокорозія бетону залізобетонних блоків обробки метрополітену *Збірник наукових праць УкрДАЗТ* 56 (2003) 126-135.

29. Плугин А.Н., Плугин А.А., Плугин Д.А., Трикоз Л.В., Плугин Ал.А. Разработка схем протекания постоянных токов утечки через бетонные и железобетонные конструкции *Збірник наукових праць УкрДАЗТ* 143 (2014) 115–124. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.143.2014.79031>

30. Trykoz L., Kamchatnaya S., Borodin D., Atynian A., Tkachenko R. Protection of railway infrastructure objects against electrical corrosion *Anti-Corrosion Methods and Materials* 68(5) (2021) 380–384. <https://doi.org/10.1108/ACMM-05-2021-2483>

31. Korkh, O., Sopov, V., Butska, L., Makarenko, O., Pershina, L. Thermodynamic calculation of alkali-silica reaction *AIP Conf. Proc.* 2490 (2023) 050023 <https://doi.org/10.1063/5.0144192>

32. Victor Sopov; Elena Sharlay; Ekaterina Latorets; Mariya Gavrilovskaya Bio-receptive concrete for vertical greening of facades *AIP Conf. Proc.* 2490 (2023) 050003. <https://doi.org/0.1063/5.0122708>

33. Plugin A., Trykoz L., Donets O., Nykytynskyj A., Pluhin A. Diagnostics and regulation of rheological characteristics for injection mortars by electromechanical sensors. *E3S Web of Conferences*, 2020, 166, 06006. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016606006>

34. Трикоз Л.В., Зінченко О.С. Никитинський А.В., Романенко О.В. Оцінювання гранулометричного складу вторинних заповнювачів, отриманих із відходів бетону *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту* 206 (2023) 121-128. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.206.2023.296685>

35. Зверєва А.С., Мірошніченко С.В. Полімеркомпозиційний прокладний шар для плит безбаластного мостового полотна. *Зб. мат. всеукраїнської інтернет-конференції молодих учених і студентів «Проблеми та перспективи. Композиційні будівельні матеріали і вироби – шляхи підвищення надійності, довговічності, корозієстійкості».* ПНТУ, Полтава (2015) 50-52.

36. Шуба Т., Чистяк В., Перестюк В., Єлякіна О., Забіяка О.А., Плуґін А.А. Досвід застосування нових конструкцій безбаластного залізничного полотна у Польщі та оцінка перспектив їх застосування в Україні *Зб. наук. праць УкрДАЗТ* 122 (2011) 201–221.

37. Забіяка О.А. Механізм тріщиноутворення у плитах безбаластного полотна та опорах залізничних мостів і підвищення їх тріщиностійкості. Дис. к.т.н. УкрДУЗТ, Харків (2015) 217 с.

38. Зверєва А.С. Полімермінеральні композити з регульованими деформативними властивостями для основ залізобетонних транспортних споруд. Дис. к.т.н. УкрДУЗТ, Харків (2021) 246 с.

39. Marczuk A., Kamiński J.R., Viselga G., Turla V., Jasinskas A., Ugnenko E. Soil compaction with wheels of manure spreader aggregates *Transport* 36(6) (2022) 463–473. <https://doi.org/10.3846/transport.2021.16285>
40. Freudenstein S., Geisler K., Mölter T., Missler M. Ballastless track on bridges. In book: *BallastlessTracks* (2017)
41. Поляков В.Ю., Данг Н.Т. Безбалластное мостовое полотно на ВСМ *Мир транспорта* 16(2) (2018) 36–55.
42. Плугін А.А., Мірошніченко С.В., Люб'як О.В., Забіяка О.А., Линник Г.О., Шуба Т. Аналіз напружено-деформованого стану плит безбалластного мостового полотна і прокладного шару під ними *Зб. наук. праць УкрДАЗТ* 148 (2) (2014) 104–110.
43. Інструкція з визначення умов пропуску рухомого складу по металевих та залізобетонних залізничних мостах (ЦП-0093). Укрзалізниця, Київ (2002) 301 с.
44. Plugin A., Murygina N., Miroshnichenko S., Kaliuzhna O. Materials for Connecting Railway Reinforced Concrete Bridge Deck with Steel Bridge Structures. *Lecture Notes in Civil Engineering* 290 (2023). https://doi.org/10.1007/978-3-031-14141-6_32
45. Городецкий А.С., Евзеров И.Д. Компьютерные модели конструкций. Факт, Київ (2007) 394 с.
46. Грибко О.В. Капітальний ремонт мосту на основі нового конструктивно-технологічного рішення прокладного шару залізобетонного безбалластного мостового полотна мостів на ВШМ. Пояснювальна записка і розрахунки до дипломного проекту зі спеціальності 273 «Залізничний транспорт». УкрДУЗТ, Харків, (2022)
47. Fediuk R., Smoliakov A., Muraviov A. Mechanical Properties of Fiber-Reinforced Concrete Using Composite Binders *Advances in Materials Science and Engineering* 2316347(2017).
<https://www.hindawi.com/journals/amse/2017/2316347/>

48. Reiterman P., Holcapek O., Joglem., Konvalinka P. Physical and Mechanical Properties of Composites Made with Aluminous Cement and Basalt Fibers Developed for High Temperature Application *Advances in Materials Science and Engineering* 4 (2015) 1–10. <https://doi.org/10.1155/2015/703029>
49. Лейбук Я.С., Скорик О.О., Муригіна Н.О., Зверева А.С. Експериментальне визначення приведеної маси колії. Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика, 15 (2019) 41-46. <https://doi.org/10.15802/bttrp2019/172384>
50. Вітольберг В.Г., Потапов Д.О., Малішевська А.С., Муригіна Н.О. Аналіз експлуатаційної стійкості рейок на лініях Харківського метрополітену. Збірник наукових праць УкрДУЗТ, 184 (2019) 102-107. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.184.2019.176427>
51. Shevchenko A.A., Matviienko O.O., Lyuty V.A., Manuylenko V.G. Murygina N.A. Digital models and the effect of error when shooting terrain for high-speed traffic. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 708 (2019) 012028. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/708/1/01202>
52. Bugaєc N.V. Shevchenko A. A. Murygina N.A. Shevchenko O.S Development of a mathematical model of joint work of the way and rolling stock in the zone of rail joints. Proceedings of the XX International Scientific and Practical Conference International Trends in Science and Technology Vol.1, December 28, 2019, Warsaw, Poland. (ISBN 978-83-955313-8-5). P. 30-38.
53. Штомпель А.М., Малішевська А.С., Муригіна Н.О. Нормативна база для призначення ремонтів колії на залізницях України. Almanahul SWorld, 2 (2019) 25-30. <https://sworld.com.ua/alsw/alsw-2.pdf>
54. Taylor H.F.W. Cement Chemistry. Academic Press, London, 1990.
55. Kurdowski W. Cement and Concrete Chemistry. Springer, 2014. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-7945-7>

56. Marushchak U., Sanytsky M., Sydor N. Design of rapid hardening engineered cementitious composites for sustainable construction *SSP - Journal of Civil Engineering* 12(2) (2017) 107-112. <https://doi.org/10.1515/sspjce-2017-0026>
57. Pöllmann, H., Syntheses, properties and solid solution of ternary lamellar calcium aluminate hydroxi salts (AFm-phases) containing SO_4^{2-} , CO_3^{2-} and OH^- *Neues Jb. Miner. Abh.* 182(2) (2006) 173-181.
58. Matschei T., Lothenbach B., Glasser F.P. The AFm phase in Portland cement *Cem. Concr. Res.* 37(2) (2007) 118-130.
59. Kondrashchenko E.V., Babushkin V.I., Kostyuk T.A., Bobko V.A., Proshchin O.Yu. Evaluation of the corrosion resistance of the armature under the protective layer "Viatron", *VisnikNTU "KhPI"*, 41 (2004) 20-22.
60. Плуґін А.А., Костюк Т.О., Процин О.Ю., Бондаренко Д.О., Плуґін О.А. Гідроізоляційні цементні композити проникної дії. Колегіум, Харків (2018) 268 с.
61. Plugin A.A., Kostiuk T.O., Plugin O.A., Bondarenko D.O., Sukhanova Yu.A., Partala N.N. Interaction of Mineral and Polymer Fibers with Cement Stone and their Effect on the Physical-Mechanical Properties of Cement Composites *International Journal of Engineering Research in Africa* 31 (2017) 59-68. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/JERA.31.59>
62. Кузнецова Т.В. Алюминатные и сульфоалюминатные цементы. Стройиздат (1986) 208 с.
63. Кузнецова Т.В. Производство и применение сульфоалюминатных цементов *Строительные материалы* 3 (2010) 29-32.
64. Несветаев Г.В., Удодов С.А., Бычкова О.А. О влиянии состава модифицированного гипсоглиноземистого расширяющегося цемента на прочность и темп твердения *Интернет-журнал Науковедение* 7(6) (2015).
65. Кузнецова Т.В. Состав, свойства и применение сульфоалюминатного цемента *Вестник науки и образования Северо-Запада России* 4(1) (2018) 1-7.

66. Шабанова Г.М., Корогодська А.М., Гапонова Є.А., Ворожбіян Р.М., Гамова О.А., Девятова Н.Б., Левадна С.В. Ресурсозберігаюча технологія глиноземистих цементів. НТУ «ХПІ», Харків (2020) 236 с.

67. ДСТУ Б EN 14647:2015 Цемент кальцієво-алюмінатний. Склад, технічні умови та критерії відповідності (EN 14647:2005, IDT + EN 14647:2005/AC:2006, IDT)

68. Глиноземистый цемент, производство и применение глиноземистого цемента. <https://www.voscem.ru/articles/cement-vidy/glinozemcem/>

69. Isidac 40. Building Chemicals. Special cement for your special products! Cimsa. <https://www.cimsa.com.tr>

70. Fibre reinforced materials. Practical studies from the building research establishment. The Construction Press, Lancaster, London, New York (1977).

71. Дворкін Л.Й., Бабич Є.М., Житковський В.В. та ін. Високоміцні швидкотверднучі бетони та фібробетони. Національний університет водного господарства та природокористування, Рівне (2017) 331 с.

72. Js A., Muthusubramanian B. Influence of Basalt Fiber and Slag on the Moduli of Elasticity of Fine-Grained Concrete. In book: Sustainable Innovations in Construction Management (2023). https://doi.org/10.1007/978-981-99-6233-4_43

73. Vorokhaiev A., Barabash I., Ksionshkevich L., Zeljko K., Grynyova I. Fine-grained Fiber Concrete on Mechanoactivated Portlandcement. Croatian Regional Development Journal 2(1) (2021) 41-49. DOI: 10.2478/crdj-2021-0007

74. Nurbayeva M., Aruova L., Kalym S., Toleubayeva Sh., Urkinbayeva Zh., Aukazhieva Zh., Ospanova Zh., Budikova A., Zhakanov A. Influence of Fiber on the Strength Characteristics of Fine-Grained Concrete. In book: Proceedings of 2021 4th International Conference on Civil Engineering and Architecture (2022). DOI: 10.1007/978-981-16-6932-3_13

75. Федоренко Ю.В., Сопов В.П. Удосконалення технології самоочисних бетонних водойм *Науковий вісник будівництва* 105(3) (2021) 168–174. DOI: 10.29295/2311-7257-2021-105-3-168-174

76. Concrete Canvas. <https://www.concretecanvas.com/>

77. Пат.111024 UA Композиція для виготовлення рулонного матеріалу для гідроізоляції та ремонту. А.А.Плугін, Т.О.Костюк, О.А.Плугін, Д.О.Бондаренко, Н.М.Партала, Ю.А.Суханова. УкрДУЗТ. Заявл.17.11.2014, заявка № 2014 12308. Опубл.10.03.2016, бюл.№5.

78. Костюк Т.А., Плугин А.А., Арутюнов В.А., Партала Н.М., Суханова Ю.А. Рулонный композиционный материал для ремонта и гидроизоляции бетонных, железобетонных и каменных конструкций и сооружений. *Зб. наук. праць УкрДУЗТ*, 143 (2014) 103-110.

79. Суханова Ю.А., Плугин А.А. Разработка рулонного композиционного материала для ремонта подводных сооружений. *Зб. наук. праць УкрДУЗТ*, 160 (додаток) (2016) 87-81.

80. Описание и фото синтепона: что это такое, как выглядит наполнитель и на какую температуру он рассчитан? <https://protkan.com/tkani/napolniteli/chto-takoe-sintepon.html>.

81. Плугін А.А., Муригіна Н.О., Малішевська А.С., Муригін М.А., Манько Н.С. Матеріали для сполучення залізничного залізобетонного мостового полотна зі сталевими мостовими конструкціями. Матер. 82 Міжнар. наук.-практ. конфер. «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту», 20-21 квітня 2023 р. За ред. Ю.С.Пройдака, Р.В.Маркуля. УкрДУНТ, Дніпро (2023) 364-366. <http://eadnurt.diit.edu.ua/jspui/handle/123456789/16951>

82. Плугін А.А., Муригіна Н.О., Мірошніченко С.В. Порівняльний аналіз матеріалів для прокладного шару залізничного безбаластного мостового полотна. Міжнар. наук.-техн. конфер. «Органічні і мінеральні в'язучі та дорожні бетони на їх основі». ХНАДУ. Харків. 08-09.11.2022.

C.118-121. https://rcf.khadi.kharkov.ua/fileadmin/user_upload/Збірник_тез_Редакція.pdf

83. ДСТУ Б В.2.7-53-96 Будівельні матеріали. Листи азбестоцементні хвилясті. Технічні умови

84. ДСТУ Б EN 196-3:2015 Методи випробування цементу. Частина 3. Визначення строків тужавлення та рівномірності зміни об'єму (EN 196-3:2005+A1:2008, IDT)

85. Plugin A.A., Zhu W., Murygin M.A., Plugin D.A., Murygina N.O. New research methods of electro-corrosion processes in concrete structures. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1376 (2024) 012018. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1376/1/012018>

86. Пługін А.А., Zhu W., Муригін М.А., Пługін Д.А., Муригіна Н.О. Нові методи досліджень електрокорозійних процесів у конструкціях із бетону. II Всеукр. наук.-практ. конфер. «ВІМ-технології в будівництві: Досвід та інновації». Харків, 15-16.12.2023, ХНУМГ (2023) 94-95. https://knameedu-my.sharepoint.com/personal/nnibci_kname_edu_ua/_layouts/15/onedrive.aspx?id=%2Fpersonal%2Fnnibci%5Fkname%5Fedu%5Fua%2FDocuments%2F%21%20%D0%A1%D0%90%D0%99%D0%A2%2FTezy%5FBIM%5F2023%2Epdf&parent=%2Fpersonal%2Fnnibci%5Fkname%5Fedu%5Fua%2FDocuments%2F%21%20%D0%A1%D0%90%D0%99%D0%A2&ga=1

87. STS SEM Nech Solutions. <https://www.semtechsolutions.com/product/win11-jeol-6390lv-refurbished-sem/>

88. Corbman B.P. Textiles: Fibre to Fabric. Gregg Division McGraw-Hill, 6th ed. (1985) 576 p.

89. Encyclopedia of Polymer Science and Technology: Polyester Fibers. Interscience Publishers (1969)

90. Seymour R.B. Polymer chemistry: An introduction. Marcel Dekker Inc; 2nd ed. (1987) 720 p.

91. Smith, J., & Johnson, R. Properties and Applications of Polyester Fibers. *Journal of Applied Polymer Science*, 145(3) (2020) 123-130.

92. Teijin Technical Data Sheet: Polyester Fibers. MatWeb material property data. <https://www.matweb.com/search/GetMatlsByManufacturer>

93. Костюк Т.А., Плугин Ал.А., Плугин А.А., Арутюнов В.А., Партала Н.Н., Суханова Ю.А., Фишер Х.-Б. Влияние волокнистых наполнителей на физико-механические свойства цементных композитов. *Зб. наук. праць УкрДАЗТ* 148 (2) (2014) 32–38.

94. Пługін А.М., Пługін А.А., Трикоз Л.В., Кагановський О.С., Пługін О.А. Основи теорії твердіння, міцності, руйнування і довговічності портландцементу, бетону і конструкцій із них. Т.1. Колоїдна хімія та фізико-хімічна механіка цементних бетонів. За ред. А.М.Плугіна. Наукова думка, Київ (2011) 331 с.

95. Пługін А.М., Пługін А.А., Калінін О.А., Мірошніченко С.В., Пługін Д.А., Кагановський О.С., Пługін О.А., Градобоев О.В. Основитеорії твердіння, міцності, руйнування і довговічності портландцементу, бетону і конструкцій ізних. Т.2. Теорія твердіння портландцементу. За ред. А.М.Плугіна. Наукова думка, Київ (2012) 224 с.

96. Пługін А.М. Пługін А.А., Калінін О.А., Мірошніченко С.В., Пługін Д.А., Кагановський О.С., Пługін О.А., Градобоев О.В., Борзяк О.С. Основи теорії твердіння, міцності, руйнування і довговічності портландцементу, бетону і конструкцій із них. Т.3. Теорія міцності, руйнування і довговічності бетону, залізобетону та конструкцій із них. За ред. А.М.Плугіна. Наукова думка, Київ (2012) 288 с.

97. Plugin A., Borziak O., Nyktynskyi A., Zhyhlo A., Zhuravel V. Correlation between crystallographic characteristics (according to the X-ray structural analysis data) and electrosurface mineral potentials. *AIP Conference Proceedings* 2684 (2023) 040019. <https://doi.org/10.1063/5.0120005>

98. Арутюнов В.А. Рулонний композиційний матеріал для ремонту та гідроізоляції з підвищеними фізико-механічними характеристиками. Дис. к.т.н. 05.23.05. Харківський національний університет будівництва та архітектури (2014) 140 с.

99. Плугін А.А., Калинин О.А., Плугін О.А. Основи наукових досліджень. Український державний університет залізничного транспорту (2013) 378 с.

100. Горшков В.С., Тимашев В.В., Савельев В.Г. Методы физико-химического анализа вяжущих веществ. Высшая школа (1981) 335 с.

101. Плугін А.А., Муригіна Н.О., Малішевська А.С., Плугін Д.А., Муригін М.А. Розроблення та дослідження композиційного матеріалу для прокладного шару безбаластного мостового полотна. Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту. 206 (2023) 82-101. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.206.2023.296619>

102. Плугін А.А., Тулей Ю.Л., Муригіна Н.О., Плугін О.А., Муригін М.А., Мусієнко С.М. Новий композиційний матеріал для залізобетонного безбаластного мостового полотна залізничних мостів. Тези доповідей 10 Міжнар. конфер. «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд і будівель на залізничному транспорті» (ТрансБуд-2024), УкрДУЗТ, Харків (20-22.11.2024) 52-55.

103. Плугін А.А., Муригіна Н.О., Плугін Д.А., Муригін А.В., Малішевська А.С. Дисперсно армовані поліефірним волокном цементні композити для прокладного шару між залізобетонним мостовим полотном і металевими балками залізничних мостів. Збірник тез міжнар. наук.-техн. конфер. «Структурутворення та руйнування композиційних будівельних матеріалів та конструкцій», ОДАБА, Одеса, 23.04.2024. С.111-114. <https://drive.google.com/file/d/1jI7vWluCtPrF4HO4P4BpNs-at6XPvwR/view>

104. Пат. на кор. модель 155132 UA МПК E04B 5/10 (2006.01) Спосіб ремонту безбаластного мостового полотна залізничних мостів із

залізобетонних плит. УкрДУЗТ. А.А.Плугін, Н.О.Муригіна, А.В.Муригін, С.В.Панченко, Д.А.Плугін, W.Zhu, О.А.Плугін, О.А.Дудін, М.А.Муригін, С.М.Мусієнко. Заявл. 28.08.2023, заявка № u 2023 04061, опубл.17.01.2024, бюл.№3/2024.

105. Спосіб улаштування прокладного шару між сталевими балками залізничного мосту і залізобетонними плитами безбаластного мостового полотна. УкрДУЗТ. А.А.Плугін, Н.О.Муригіна, С.В.Мірошніченко, Т.О.Костюк, С.В.Панченко, Г.Л.Ватуля, Д.О.Плугін, О.А.Калінін, О.А.Плугін, О.В.Лобяк, А.В.Муригін, О.А.Дудін. Заявка на видачу патенту на винахід №а 2022 04805. Заявл. 19.12.2022.

106. Пат. на кор. модель 153601 UA Спосіб улаштування прокладного шару міжсталевими балками залізничного мосту і залізобетонними плитами безбаластного мостового полотна МПК E04B 5/10 (2006.01). УкрДУЗТ. А.А.Плугін, Н.О.Муригіна, С.В.Мірошніченко, Т.О.Костюк, С.В.Панченко, Г.Л.Ватуля, Д.О.Плугін, О.А.Калінін, О.А.Плугін, О.В.Лобяк, А.В.Муригін, О.А.Дудін. Заявл.19.12.2022, Заявка №u 2022 04806. Пріоритет 27.07.2023. Опубл.26.07.2023, Бюл.№30.

107. Спосіб ремонту безбаластного мостового полотна залізничних мостів із залізобетонних плит. УкрДУЗТ. А.А.Плугін, Н.О.Муригіна, А.В.Муригін, С.В.Панченко, Д.А.Плугін, W.Zhu, О.А.Плугін, О.А.Дудін, М.А.Муригін, С.М.Мусієнко. Заявка на видачу патенту на винахід №а 2023 04060. Заявл. 28.08.2023

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

Список наукових праць здобувача

1. Пługін А.А., Муригіна Н.О., Малішевська А.С., Пługін Д.А., Муригін М.А. Розроблення та дослідження композиційного матеріалу для прокладного шару безбаластного мостового полотна. Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту. 206 (2023) 82-101. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.206.2023.296619>
2. Лейбук Я.С., Скорик О.О., Муригіна Н.О., Зверєва А.С. Експериментальне визначення приведеної маси колії. Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика, 15 (2019) 41-46. <https://doi.org/10.15802/bttrp2019/172384>
3. Вітольберг В.Г., Потапов Д.О., Малішевська А.С., Муригіна Н.О. Аналіз експлуатаційної стійкості рейок на лініях Харківського метрополітену. Збірник наукових праць УкрДУЗТ, 184 (2019) 102-107. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.184.2019.176427>
4. Plugin A.A., Zhu W., Murygin M.A., Plugin D.A., Murygina N.O. New research methods of electro-corrosion processes in concrete structures. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1376 (2024) 012018. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1376/1/012018>
5. Plugin A., Murygina N., Miroshnichenko S., Kaliuzhna O. Materials for Connecting Railway Reinforced Concrete Bridge Deck with Steel Bridge Structures. In: Blikharsky, Z. (eds) Proceedings of EcoComfort 2022. Lecture Notes in Civil Engineering, Springer, 290 (2023) 318-328. https://doi.org/10.1007/978-3-031-14141-6_32
6. Shevchenko A.A., Shevchenko O.S., Lyuty V.A., Manuylenko V.G., Murygina N.A. Possible throughput of passenger trains on the accelerated lines of Ukraine AIP Conference Proceedings 268431 (2023) 0200119. <https://doi.org/10.1063/5.0121320>

7. Shevchenko A.A., Matviienko O.O., Lyuty V.A., Manuylenko V.G., Murygina N.A. Systems and subsystems of track, control and management of high-speed railway IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 1021 (2021) 012027 <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1021/1/012027>

8. Shevchenko A.A., Matviienko O.O., Lyuty V.A., Manuylenko V.G., Murygina N.A. Digital models and the effect of error when shooting terrain for high-speed traffic IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 708(119) (2019) 012028. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/708/1/012028>

9. Шевченко А., Муригіна Н. Моделювання роботи дисперсно-армованого матеріалу для прокладного шару безбаластного мостового полотна Наука і техніка сьогодні 4(4) (2022) [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2022-4\(4\)-175-182](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2022-4(4)-175-182)

10. Шевченко А., Муригіна Н. Сучасні засоби та проблематика впровадження систем оцінювання стану мостів України Наука і техніка сьогодні 8(8) (2022) [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2022-8\(8\)-175-182](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2022-8(8)-175-182)

11. Штомпель А.М., Малішевська А.С., Муригіна Н.О. Нормативна база для призначення ремонтів колії на залізницях України. Almanahul SWorld, 2 (2019) 25-30. <http://repository.vsau.org/getfile.php/21905.pdf>

12. Пат. на кор. модель 155132 UA МПК E04B 5/10 (2006.01) Спосіб ремонту безбаластного мостового полотна залізничних мостів із залізобетонних плит. УкрДУЗТ. А.А.Плугін, Н.О.Муригіна, А.В.Муригін, С.В.Панченко, Д.А.Плугін, W.Zhu, О.А.Плугін, О.А.Дудін, М.А.Муригін, С.М.Мусієнко. Заявл. 28.08.2023, заявка № u 2023 04061, опубл.17.01.2024, бюл.№3/2024.

https://sis.nipo.gov.ua/media/UTILITY_MOD/2023/u202304061/published_description.pdf

13. Пат. на кор. модель 153601 UA Спосіб улаштування прокладного шару між сталевими балками залізничного мосту і залізобетонними плитами безбаластного мостового полотна МПК E04B 5/10 (2006.01). УкрДУЗТ.

А.А.Плугін, Н.О.Муригіна, С.В.Мірошніченко, Т.О.Костюк, С.В.Панченко, Г.Л.Ватуля, Д.О.Плугін, О.А.Калінін, О.А.Плугін, О.В.Лобяк, А.В.Муригін, О.А.Дудін. Заявл.19.12.2022, Заявка №u 2022 04806. Пріоритет 27.07.2023. Опубл.26.07.2023, Бюл. №30. <http://lib.kart.edu.ua/handle/123456789/18014>

14. Спосіб улаштування прокладного шару між сталевими балками залізничного мосту і залізобетонними плитами безбаластного мостового полотна. УкрДУЗТ. А.А. Плугін, Н.О. Муригіна, С.В. Мірошніченко, Т.О. Костюк, С.В. Панченко, Г.Л. Ватуля, Д.О. Плугін, О.А. Калінін, О.А. Плугін, О.В. Лобяк, А.В. Муригін, О.А. Дудін. Заявка на видачу патенту на винахід №a 2022 04805. Заявл. 19.12.2022. <http://lib.kart.edu.ua/handle/123456789/18014>

15. Спосіб ремонту безбаластного мостового полотна залізничних мостів із залізобетонних плит. УкрДУЗТ. А.А. Плугін, Н.О. Муригіна, А.В. Муригін, С.В. Панченко, Д.А. Плугін, W. Zhu, О.А. Плугін, О.А. Дудін, М.А. Муригін, С.М. Мусієнко. Заявка на видачу патенту на винахід №a 2023 04060. Заявл. 28.08.2023. https://sis.nipo.gov.ua/media/UTILITY_MOD/2023/u202304061/published_description.pdf

Відомості про апробацію результатів дисертації:

1. Плугін А.А., Тулей Ю.Л., Муригіна Н.О., Плугін О.А., Муригін М.А., Мусієнко С.М. Новий композиційний матеріал для залізобетонного безбаластного мостового полотна залізничних мостів Тези доповідей 10 Міжнар. конфер. «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд і будівель на залізничному транспорті» (ТрансБуд-2024), УкрДУЗТ, Харків (20-22.11.2024) 52-55. <https://kart.edu.ua/wp-content/uploads/2024/09/tezi-transbud-2024-2.pdf>

2 Плугін А.А., Муригіна Н.О., Плугін Д.А., Муригін А.В., Малішевська А.С. Дисперсно армовані поліефірним волокном цементні композити для

прокладного шару між залізобетонним мостовим полотном і металевими балками залізничних мостів. Збірник тез міжнар. наук.-техн. конфер. «Структурутворення та руйнування композиційних будівельних матеріалів та конструкцій», ОДАБА, Одеса (23.04.2024) 111-114.

<https://drive.google.com/file/d/1jI7vWluCtPrF4HO4P4BpNs-at6XPvwR/view>

3. Пługін А.А., Zhu W., Муригін М.А., Пługін Д.А., Муригіна Н.О. Нові методи досліджень електрокорозійних процесів у конструкціях із бетону. II Всеукр. наук.-практ. конфер. «ВІМ-технології в будівництві: Досвід та інновації». ХНУМГ, Харків (15-16.12.2023) 94-95.

https://dmg.kname.edu.ua/images/other/Tezi_BIM_2023.pdf

4. Пługін А.А., Муригіна Н.О., Малішевська А.С., Муригін М.А., Манько Н.С. Матеріали для сполучення залізничного залізобетонного мостового полотна зі сталевими мостовими конструкціями. Матер. 82 Міжнар. наук.-практ. конфер. «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту», за ред. Ю.С.Пройдака, Р.В.Маркуля. УкрДУНТ, Дніпро (20-21.04 2023) 364-366.

<http://eadnurt.diit.edu.ua/jspui/handle/123456789/16951>

5. Пługін А.А., Муригіна Н.О., Мірошніченко С.В. Порівняльний аналіз матеріалів для прокладного шару залізничного безбаластного мостового полотна. Міжнар. наук.-техн. конфер. «Органічні і мінеральні в'язучі та дорожні бетони на їх основі». ХНАДУ. Харків (08-09.11.2022) 118-121.

https://rcf.khadi.kharkov.ua/fileadmin/user_upload/Збірник_тез_-_Редакція_.pdf

6. Шевченко А.О., Матвієнко О.О., Лютий В.А., Мануйленко В.Г., Муригіна Н.О. Енергоменеджмент по впровадженню системи високошвидкісної залізниці Тези доповідей міжнар. наук.-техн. конфер. «Енергоефективність на транспорті». УкрДУЗТ, Харків (18-20.11.2020) 116-118.

http://eet-conf.kart.edu.ua/images/stories/konf-1/pdf/Theses_EET_2020_27.01.pdf

7. Шевченко А.О., Шевченко О.С., Лютий В.А., Мануйленко В.Г., Муригіна Н.О. Технічні вимоги експлуатації високошвидкісної залізниці України. Тези доповідей 9 Міжнар. конфер. «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд і будівель на залізничному транспорті» (ТрансБуд-2021), УкрДУЗТ, Харків (17-19.11.2021) 67-68.
<http://lib.kart.edu.ua/handle/123456789/11096>

8. Shevchenko A., Bugaec N., Murygina N., Korostelov Ye., Viselga G. Analysis of existing passenger traffic by mode of transport and assessment the competitiveness high-speed traffic in Ukraine. The 11th International Conference “Environmental Engineering” conference (11th ICEE) Vilnius, Lithuania (21-22.05.2020) <https://doi.org/10.3846/enviro.2020.689>

9. Bugaec N.V. Shevchenko A. A. MuryginaN.A. Shevchenko O.S Development of a mathematical model of joint work of the way and rolling stock in the zone of rail joints. Proceedings of the XX International Scientific and Practical Conference International Trends in Science and Technology Vol.1, December 28, 2019, Warsaw, Poland. (ISBN 978-83-955313-8-5). P. 30-38.
<https://conferences.rsglobal.pl/index.php/conf/catalog/view/16/23/382-1>

ДОДАТОК Б

Результати досліджень фізико-механічних
властивостей композитів

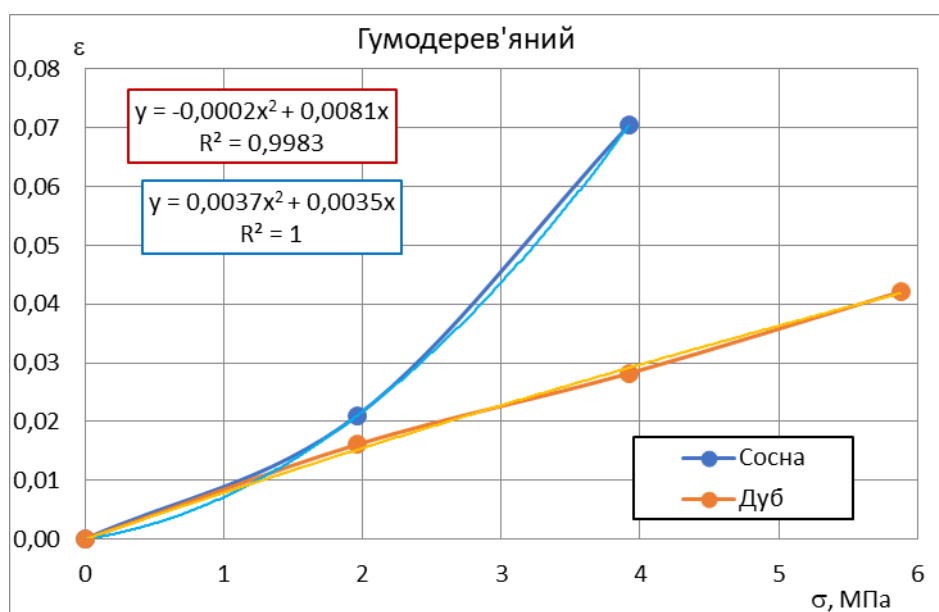
Таблиця Б.1 – Результати дослідження зразків гумодерев'яного композиту

Порода деревини	№ зразка	Склад зразка: товщина гуми товщина деревини, мм	P, кгс	σ		h, мм (між плитами пресу)					Прим.	ε	E, МПа			f, МПа
				кгс/см ³	МПа	1	2	3	4	сер			дискретний	повний	початковий	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Сосна	C1	20/100	0	0	0	119,6	121,4	120,0	118,6	119,9		0			56,3	9,4
			1000	40	3,92	109,2	106,1	117,0	113,9	111,6		0,070	56,3	56,3		
			2000	80	7,84	73,0	69,9	75,2	75,1	73,3		0,389	12,3	20,2		
			2400	96	9,41						руйн.					
	C2	10/50	0	0	0	59,0	59,8	60,0	60,6	59,9		0			77,6	4,7
			500	20	1,96	57,4	59,1	59,5	59,7	58,9		0,015	126,8	126,8		
			1000	40	3,92	55,2	57,1	58,2	56,8	56,8		0,051	55,9	77,6		
			1500	60	5,88	28,2	34,3	35,6	32,9	32,8		0,453	4,9	13,0		
			1200	48	4,70						руйн.					
	C3	10/50	0	0	0	60,2	59,7	59,5	59,8	59,8		0			67,9	4,3
			500	20	1,96	58,9	58,6	58,7	59,0	58,8		0,017	117,2	117,2		
			1000	40	3,92	56,2	56,6	56,1	56,5	56,4		0,058	47,8	67,9		
			1100	44	4,31						руйн.					
	C4	20/100	0	0	0	121,3	119,3	117,7	119,1	119,4		0			45,2	4,3
			500	20	1,96	120,1	116,4	114,9	117,3	117,2		0,018	107,6	107,6		
			1000	40	3,92	114,1	107,6	105,4	108,9	109,0		0,087	28,6	45,2		
			1100	44	4,31											
	C5	10/50	0	0	0	60,0	59,7	55,9	56,0	57,9		0			44,7	4,7
			500	20	1,96	59,4	57,7	53,5	53,2	56,0		0,034	58,2	58,2		
			1000	40	3,92	56,8	54,5	49,7	50,3	52,8		0,088	36,3	44,7		
			1200	48	4,70						руйн.					
	Сер.		0	0	0							0			58,3	5,5
			500	20	1,96							0,021				
			1000	40	3,92							0,070				

Кінець таблиці Б.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Дуб	Д1	20/100	0	0	0,00	119,8	121,2	119,8	118,5	119,8		0			122,8	7,4
			500	20	1,96	117,1	119,3	118,1	117,6	118,0		0,015	130,5	130,5		
			1000	40	3,92	115,6	117,3	116,3	114,8	116,0		0,032	116,0	122,8		
			1500	60	5,88	113,3	114,6	113,3	111,6	113,2		0,055	83,9	106,4		
			1900	76	7,45						руйн.					
	Д2	10/50	0	0	0,00	58,8	59,5	58,3	58,3	58,7		0			184,2	9,0
			500	20	1,96	58,2	58,8	57,4	57,3	57,9		0,014	143,9	143,9		
			1000	40	3,92	57,5	58,2	57,2	57,0	57,5		0,021	255,8	184,2		
			1500	60	5,88	57,0	57,9	56,8	56,3	57,0		0,029	242,3	200,2		
			2000	80	7,84	56,5	57,0	56,3	55,6	56,4		0,040	177,1	193,9		
			2300	92	9,02						руйн.					
	Д3	10/50	0	0	0,00	57,4	58,3	59,0	59,4	58,5		0			158,2	7,4
			500	20	1,96	56,7	56,7	58,6	59,2	57,8		0,012	158,2	158,2		
			1000	40	3,92	56,1	55,5	57,6	59,1	57,1		0,025	158,2	158,2		
			1500	60	5,88	55,7	54,4	57,0	58,3	56,4		0,037	158,2	158,2		
			1900	76	7,45						руйн.					
	Д4	20/100	0	0	0,00	115,4	111,2	112,6	117,4	114,2		0			111,9	7,8
			500	20	1,96	113,2	105,7	110,5	116,5	111,5		0,023	83,6	83,6		
			1000	40	3,92	112,2	104,2	109,3	114,9	110,2		0,035	168,9	111,9		
			1500	60	5,88	110,5	103,0	108,2	113,5	108,8		0,047	165,7	125,5		
			2000	80	7,84						руйн.					
	Сер.		0	0	0,00							0			144,3	7,9
			500	20	1,96							0,016				
			1000	40	3,92							0,028				
			1500	60	5,88							0,042				

а)



б)

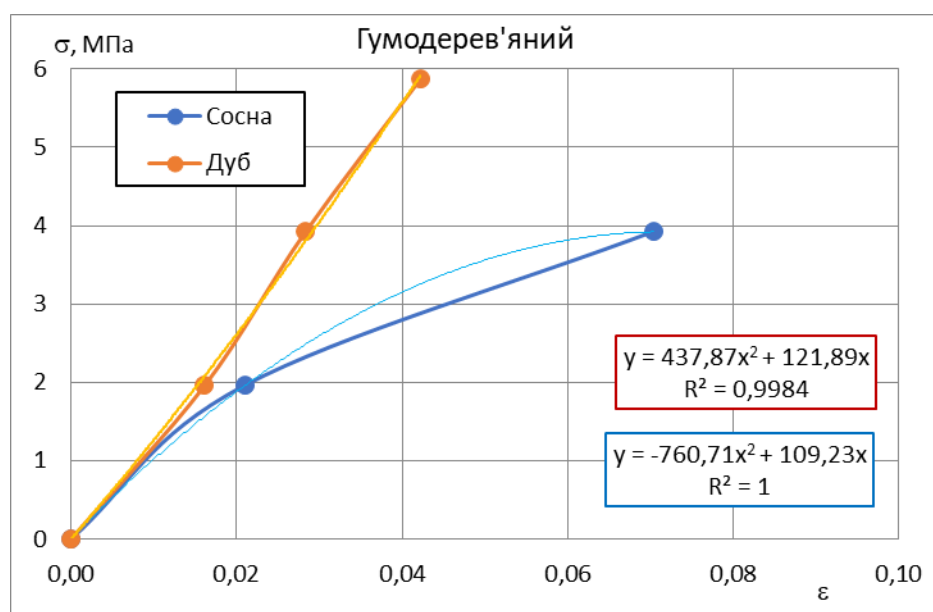


Рисунок Б.1 – Криві деформування зразків гумодерев'яного композиту
у форматі $\varepsilon = f(\sigma)$ (а) і $\sigma = f(\varepsilon)$ (б)

Таблиця Б.2 – Експериментальні склади композиту на основі цементу і НМОС

№ серії зразків	Цемент	Товщина НМОС, мм	Склад суміші Ц:П		Витрата, г				К-ть пластин на серію 9 зразків	Витрата суміші на об'єм НМОС, кг/м³	Витрата, кг	
					на 1 см²	на пластину 20×20 см					Ц	П
					суміші							
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	ПЦ І-500 Р-Н	10	1	0	0,33	132	132	0	3	330	5,36	4,24
2			1	0	0,67	268	268	0	3	670		
3			1	0	1	400	400	0	3	1000		
4			1	1	0,33	132	66	66	3	330		
5			1	1	0,67	268	134	134	3	670		
6			1	1	1	400	200	200	3	1000		
7			1	1,5	0,33	132	53	79	3	330		
8			1	1,5	0,67	268	107	161	3	670		
9			1	1,5	1	400	160	240	3	1000		
10			1	2	0,33	132	44	88	3	330		
11			1	2	0,67	268	89	179	3	670		
12			1	2	1	400	133	267	3	1000		
13	ПЦ І-500 Р-Н	20	1	0	0,33	132	132	0	2	165	17,6	9,8
14			1	0	0,67	268	268	0	2	335		
15			1	0	1	400	400	0	2	500		
16			1	0	1,5	600	600	0	2	750		
17			1	0	2	800	800	0	2	1000		
18			1	1	0,33	132	66	66	2	165		
19			1	1	0,67	268	134	134	2	335		
20			1	1	1	400	200	200	2	500		
21			1	1	1,5	600	300	300	2	750		
22			1	1	2	800	400	400	2	1000		
23			1	1,5	0,33	132	53	79	2	165		
24			1	1,5	0,67	268	107	161	2	335		
25			1	1,5	1	400	160	240	2	500		
26			1	1,5	1,5	600	240	360	2	750		
27			1	1,5	2	800	320	480	2	1000		
28			1	2	0,33	132	44	88	2	165		
29			1	2	0,67	268	89	179	2	335		
30			1	2	1	400	133	267	2	500		
31			1	2	1,5	600	200	400	2	750		
32			1	2	2	800	267	533	2	1000		

Кінець таблиці Б.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
33	ГЦ: Isidac 40	20	1	0	0,5	200	200	0	2	250	7,2	5,2
34			1	0	1	400	400	0	2	500		
35			1	0	1,5	600	600	0	2	750		
36			1	0,5	0,5	200	133	67	2	250		
37			1	0,5	1	400	267	133	2	500		
38			1	0,5	1,5	600	400	200	2	750		
39			1	1	0,5	200	100	100	2	250		
40			1	1	1	400	200	200	2	500		
41			1	1	1,5	600	300	300	2	750		
42			1	0	2	800	800	0	2	1000	3,5	1,3
43			1	0,5	2	800	533	267	2	1000		
44			1	1	2	800	400	400	2	1000		

Таблиця Б.3 – Результати дослідження композитів на основі цементу і НМОС: середня густина ρ ; ступінь ущільнення h_1/h_0

Зразок	Це-мент $d_{\text{нм}}$, мм	Склад			h_0 , см	a , см	Дата форму- вання	Ранній термін						Проектний термін						h_1/h_0	$h_1/h_{0\text{сер}}$	
		П:Ц	М/НМ					Дата випро- бування	Вік, діб	h_1 , мм	h_1/h_0	m , г	ρ , кг/м ³	Дата випро- бування	Вік, діб	h_1 , мм	h_1/h_0	m , г	ρ , кг/м ³			
			г/см ²	кг/м ³						сер						сер						
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	
Про- тотип	<u>ПЦ</u> 10				8	5	23.11. 2022							23.12. 2022	30	6,22	0,778	210,5	1355	0,778	0,778	
Проб- ний	<u>ПЦ</u> 10						20.12. 2022	23.12. 2022	3	5,96	0,744	255,2	1714	19.01. 2023	30							0,744
1	<u>ПЦ</u> 10	0	0,33	330						6,46	0,807	217,2	1345			6,40	0,800	197,3	1233	0,804	0,805	
2		0	0,67	670						6,04	0,755	260,0	1723			5,50	0,688	243,0	1767	0,721	0,738	
3		0	1	1000						5,75	0,719	268,8	1869			6,32	0,790	273,0	1728	0,755	0,737	
4		1	0,33	330						6,06	0,757	212,3	1402								0,757	
5		1	0,67	670						6,54	0,817	295,2	1807								0,817	
6		1	1	1000						7,23	0,903	324,4	1795								0,903	
7		1,5	0,33	330						5,87	0,733	213,7	1457								0,733	
8		1,5	0,67	670			17.01. 2023	19.01. 2023	2	6,40	0,800	288,0	1800								0,800	
9		1,5	1	1000						5,73	0,716	285,0	1990								0,716	
10		2	0,33	330						6,67	0,834	246,0	1475								0,834	
11		2	0,67	670						6,24	0,780	278,0	1782								0,780	
12		2	1	1000						6,12	0,765	281,0	1837								0,765	
13	<u>ПЦ</u> 20	0	0,33	165			20.01. 2023	23.01. 2023	3	5,99	0,749	211,0	1408	17.02. 2023	28	7,43	0,929	245,8	1323	0,839	0,794	
14		0	0,67	330						5,91	0,739	256,0	1732			6,96	0,870	211,4	1215	0,805	0,772	
15		0	1	500						7,22	0,903	312,0	1729			7,44	0,930	271,1	1458	0,916	0,909	
16		0	1,5	750			23.02. 2023	26.02. 2023		6,94	0,868	335,0	1931	23.03. 2023	28						0,868	
17		0	2	1000						6,17	0,771	296,0	1919								0,771	
18		1	0,33	167			20.01. 2023	23.01. 2023		8,07	1,008	272,0	1349	17.02. 2023	28	7,00	0,875	204,5	1169	0,942	0,975	
19		1	0,67	334						7,13	0,891	306,0	1717			6,50	0,813	276,0	1698	0,852	0,872	
20		1	1	500						6,81	0,851	316,0	1857			6,40	0,800	280,6	1754	0,826	0,838	

Кінець таблиці Б.3

1	2	3	4	5	6	7		8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	
21		1	1,5	750	8	5		23.02. 2023	26.02. 2023	3	6,36	0,795	340,0	2138	23.03. 2023	28							0,795
22		1	2	1000				20.01. 2023	23.01. 2023		6,70	0,838	353,0	2107	17.02. 2023	28							0,838
23		1,5	0,33	165							7,51	0,939	259,0	1379			6,95	0,869	221,9	1277	0,904	0,922	
24		1,5	0,67	330							7,27	0,909	310,0	1706			6,35	0,794	248,0	1562	0,851	0,880	
25		1,5	1	500				23.02. 2023	26.02. 2023		7,08	0,886	332,0	1875	23.03. 2023	28	6,74	0,843	268,3	1592	0,864	0,875	
26		1,5	1,5	750							6,65	0,831	334,0	2009									0,831
27		1,5	2	1000							6,34	0,793	325,0	2050									0,793
28		2	0,33	165				20.01. 2023	23.01. 2023		7,86	0,983	257,0	1307	17.02. 2023	28	7,50	0,938	234,3	1250	0,960	0,972	
29		2	0,67	330							6,91	0,864	318,0	1841			6,55	0,819	237,0	1447	0,841	0,852	
30		2	1	500							7,44	0,930	337,0	1813			6,53	0,816	279,6	1713	0,873	0,901	
31		2	1,5	750				23.02. 2023	26.02. 2023		6,40	0,800	309,0	1931	23.03. 2023	28							0,800
32		2	2	1000							6,60	0,825	337,0	2042								0,825	
33	ГЦ 20	0	0,5	250	8	5,472	5,411	02.03. 2024	04.03. 2024	2	5,468	0,684	187,0	1368	08.04. 2024	37	5,66	0,708	171,7	1213	0,696	0,690	
34		0	1	500		5,404	4,983				5,645	0,706	230,3	1632			5,02	0,628	159,0	1267	0,667	0,686	
35		0	1,5	750		5,164	5,231				5,789	0,724	233,8	1615			5,60	0,700	227,0	1621	0,712	0,718	
36		0,5	0,5	250		5,292	5,428				5,985	0,748	196,0	1310			6,18	0,773	196,9	1274	0,760	0,754	
37		0,5	1	500		5,355	5,309				6,682	0,835	278,0	1664			5,03	0,629	176,1	1400	0,732	0,784	
38		0,5	1,5	750		5,346	5,445				6,297	0,787	270,6	1719			6,28	0,785	256,8	1636	0,786	0,787	
39		1	0,5	250		5,221	5,318				6,630	0,829	227,0	1370			6,21	0,776	191,1	1231	0,803	0,816	
40		1	1	500		5,437	5,473				6,029	0,754	263,3	1747			5,04	0,630	50,4	400	0,692	0,723	
41		1	1,5	750		5,458	5,252				7,120	0,890	308,3	1732			6,66	0,833	286,9	1723	0,861	0,876	
42		0	2	1000							6,431	0,804											
43		0,5	2	1000							5,706	0,713											
44		1	2	1000							6,946	0,868											

Таблиця Б.4 – Результати досліджень деформативності композиту на основі цементу і НМОС (випробувань навантаженням P , σ): відносна деформація ε , модуль деформації E , границя міцності f

№ зра- зка	Склад		а, см	Р, кгс	σ		Ранній термін											Проектний термін													
	П: Ц	М/НМ г/см²			кгс/см³	МПа	h, мм (між плитами пресу)					Прим .	ε	E, МПа			f, МПа	h, мм (між плитами пресу)					ε	E, МПа			f, МПа				
							1	2	3	4	сер			дискр	повн	поч		1	2	3	4	сер		дискр	повн	поч					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28				
Прототип			5	0	0	0					54,0		0			22,7	5,9	62,9	64,7	61,4	55,8	61,2	0			17,6	15,3				
				1000	40	3,92													49,0	51,5	47,3	42,5	47,6	0,223	17,6			17,6			
				1500	60	5,88					40,0		0,259	22,7	22,7																
				2000	80	7,84																									
				3000	120	11,76					39,0		0,278	317,5	42,3																
				3900	156	15,29																									
				4500	180	17,64					37,0		0,315	158,8	56,0																
				5000	200	19,6					36,0		0,333	105,8	58,8																
				6000	240	23,52																									
				7000	280	27,44																									
				8000	320	31,36					31,5		0,417	141,1	75,3																
				9000	360	35,28					26,0		0,519	38,5	68,0																
				10000	400	39,2					23,5		0,565	84,7	69,4																
				Пробний			5	0	0	0	60,0	52,8	56,0	64,3	58,3				0			69,8	11,8								
1000	40	3,92	56,5					49,2	52,3	62,0	55,0		0,056	69,8	69,8																
2000	80	7,84	52,9					45,5	48,7	58,9	51,5		0,116	65,3	67,4																
3000	120	11,76	48,5					40,9	44,3	53,9	46,9		0,195	49,7	60,2																
3900	156	15,29	33,4					27,0	30,6	40,1	32,8		0,438	14,6	34,9																
5000	200	19,6	30,4					23,3	26,7	37,0	29,4		0,496	73,4	39,5																
6000	240	23,52	29,0					21,3	24,5	35,3	27,5		0,528	125,2	44,6																
7000	280	27,44	27,0					20,2	23,7	33,8	26,2		0,551	169,2	49,8																
8000	320	31,36	26,0					18,3	22,4	32,8	24,9		0,573	175,7	54,7																
9000	360	35,28	25,2					17,4	21,0	31,7	23,8		0,591	217,6	59,7																
10000	400	39,2	24,3					16,5	19,7	31,3	23,0		0,606	261,1	64,7																

Продовження табл. Б.4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
1	0	330	5	0	0	0	62,0	55,7	59,8	68,0	61,4		0			9,4	7,8	62,4	63,2	61,8	63,7	62,8	0			18,6	11,8
				1000	40	3,92	37,5	30,7	30,5	43,9	35,7		0,419	9,4	9,4			51,0	44,0	47,0	56,2	49,6	0,211	18,6	18,6		
				2000	80	7,84	31,3	23,5	26,7	37,9	29,9		0,514	41,5	15,3			42,0	36,0	39,5	48,5	41,5	0,339	30,6	23,1		
				3000	120	11,76	28,0	20,3	23,5	35,2	26,8		0,564	77,6	20,8			37,5	30,0	33,5	43,5	36,1	0,425	45,8	27,7		
				4000	160	15,68	26,3	18,9	21,3	33,2	24,9		0,594	131,8	26,4			33,5	24,9	28,4	39,3	31,5	0,498	53,5	31,5		
				5000	200	19,6	25,5	15,7	20,0	32,0	23,3		0,620	148,1	31,6			29,0	22,5	25,0	35,5	28,0	0,554	69,8	35,4		
				6000	240	23,52	24,3	13,9	17,1	30,5	21,5		0,651	130,0	36,2			25,0	18,7	23,4	33,5	25,2	0,599	86,3	39,2		
				7000	280	27,44	23,1	12,5	16,5	29,7	20,5		0,667	240,6	41,2			24,3	17,0	20,7	31,0	23,3	0,630	129,5	43,6		
				8000	320	31,36	22,4	11,0	16,0	29,5	19,7		0,679	331,8	46,2			22,0	15,5	18,5	30,4	21,6	0,656	149,1	47,8		
				9000	360	35,28	21,5	10,7	15,3	28,9	19,1		0,689	384,9	51,2			21,0	14,6	18,3	29,3	20,8	0,669	307,6	52,8		
				10000	400	39,2												20,9	14,0	16,8	29,0	20,2	0,679	393,7	57,8		
				Ост.							32,0												57,8				
2	0	670	5	0	0	0	51,5	57,0	64,0	60,3	58,2		0			107,4	23,5	55,0	54,9	55,0	55,5	55,1	0			26,2	3,9
				1000	40	3,92	48,5	54,2	62,1	59,5	56,1		0,037	107,4	107,4			53,1	53,6	53,4	53,5	53,4	0,149	26,2	26,2		
				2000	80	7,84	44,5	50,0	58,3	56,1	52,2		0,103	59,3	76,4			50,6	49,0	51,3	53,0	51,0	0,188	101,5	41,7		
				3000	120	11,76	33,0	38,3	45,8	45,2	40,6		0,303	19,6	38,8			45,0	41,5	47,8	52,7	46,8	0,255	58,2	46,1		
				3500	140	13,72							0,370					27,4	24,5	30,1	36,1	29,5	0,530	7,1	25,9		
				4000	160	15,68	25,0	30,9	38,9	36,5	32,8		0,436	29,4	36,0												
				5000	200	19,6	21,5	26,7	35,0	33,3	29,1		0,500	61,7	39,2												
				6000	240	23,52	19,0	24,7	32,6	29,5	26,5		0,546	85,3	43,1												
				7000	280	27,44	17,2	23,5	31,3	30,4	25,6		0,560	268,4	49,0												
				8000	320	31,36	16,2	21,7	30,0	28,5	24,1		0,586	152,1	53,5												
				9000	360	35,28	15,2	21,9	29,3	27,3	23,4		0,598	338,0	59,0												
				Ост.							26,5		0,545														
3	0	1000	5	0	0	0	54,9	53,3	55,9	56,0	55,0		0			162,8	15,7	63,2	63,8	62,9	63,2	63,3	0			128,9	7,8
				1000	40	3,92	54,0	53,0	53,5	54,3	53,7		0,024	162,8	162,8			60,0	62,0	62,4	61,0	61,4	0,030	128,9	128,9		
				2000	80	7,84	52,2	51,3	51,5	52,5	51,9		0,057	118,2	137,0			57,5	60,3	61,9	59,0	59,7	0,057	148,1	137,8		
				2700	108	10,58							0,080					33,5	36,5	38,0	34,8	35,7	0,436	7,2	24,3		
				3000	120	11,76	49,5	49,0	49,7	50,0	49,6		0,100	92,8	118,2												
				4000	160	15,68	33,0	32,4	32,8	34,5	33,2		0,397	13,2	39,5												
				5000	200	19,6	30,5	30,0	30,5	31,0	30,5		0,446	80,6	44,0												
				6000	240	23,52	28,9	28,3	28,5	29,0	28,7		0,479	118,2	49,1												
				7000	280	27,44	27,3	26,9	27,0	27,5	27,2		0,506	143,8	54,2												
				8000	320	31,36	26,3	25,9	26,2	26,8	26,3		0,522	246,5	60,1												
				9000	360	35,28	25,1	25,0	25,2	25,7	25,3		0,541	205,4	65,2												
				Ост.							27,4		0,502														

Продовження табл. Б.4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
4	1	330	5	0	0	0	50,0	52,0	50,1	45,1	49,3		0			13,9	11,8										
				1000	40	3,92	36,5	37,9	35,9	31,2	35,4		0,282	13,9	13,9												
				2000	80	7,84	31,6	33,0	31,9	26,5	30,8		0,376	41,8	20,8												
				3000	120	11,76	29,0	30,0	27,7	23,9	27,7		0,439	62,3	26,8												
				4000	160	15,68	26,5	28,5	26,2	21,8	25,8		0,478	101,7	32,8												
				5000	200	19,6	25,9	27,0	25,0	19,8	24,4		0,505	145,9	38,8												
				6000	240	23,52	24,6	25,7	23,7	19,7	23,4		0,525	193,3	44,8												
				7000	280	27,44	23,5	25,2	22,0	18,9	22,4		0,546	188,5	50,3												
				8000	320	31,36	23,0	24,5	22,2	17,9	21,9		0,556	386,5	56,4												
				9000	360	35,28	22,5	24,0	21,9	16,5	21,2		0,569	286,3	62,0												
				Ост.							28,9		0,414														
5	1	670	5	0	0	0	66,0	66,0	64,0	61,9	64,5		0			40,4	11,8										
				1000	40	3,92	60,0	59,9	58,0	55,0	58,2		0,097	40,4	40,4												
				2000	80	7,84	45,0	44,9	41,0	40,5	42,9		0,335	16,4	23,4												
				3000	120	11,76	34,2	33,9	32,4	30,7	32,8		0,491	25,1	23,9												
				4000	160	15,68	31,0	31,0	28,9	26,5	29,4		0,545	73,3	28,8												
				5000	200	19,6	28,5	27,5	26,5	24,8	26,8		0,584	100,1	33,6												
				6000	240	23,52	26,8	26,7	25,4	23,5	25,6		0,603	206,3	39,0												
				7000	280	27,44	25,9	25,1	24,0	22,2	24,3		0,623	194,8	44,0												
				8000	320	31,36	25,0	24,9	23,5	22,2	23,9		0,629	627,9	49,8												
				9000	360	35,28	24,4	24,3	22,9	22,0	23,4		0,637	505,5	55,4												
				Ост.							26,5		0,589														
6	1	1000	5	0	0	0	69,3	69,0	68,3	66,0	68,2		0			39,4	19,6										
				1000	40	3,92	62,3	64,0	62,3	56,9	61,4		0,099	39,4	39,4												
				2000	80	7,84	38,5	41,5	39,6	32,3	38,0		0,443	11,4	17,7												
				3000	120	11,76	33,5	34,9	32,5	27,0	32,0		0,531	44,5	22,2												
				4000	160	15,68	29,5	31,5	29,5	23,5	28,5		0,582	76,9	27,0												
				5000	200	19,6	27,5	29,9	28,2	21,5	26,8		0,607	154,9	32,3												
				6000	240	23,52	27,2	28,4	26,5	19,8	25,5		0,626	205,5	37,6												
				7000	280	27,44	25,9	28,2	25,3	18,9	24,6		0,639	296,8	42,9												
				8000	320	31,36	25,6	27,5	25,0	18,5	24,2		0,646	628,6	48,6												
				9000	360	35,28	25,0	27,0	24,6	17,6	23,6		0,654	445,2	53,9												
				Ост.							26,0		0,618														

Продовження табл. Б.4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
7	1,5	330	5	0	0	0	63,0	64,6	62,3	56,5	61,6		0			9,8	3,9										
				1000	40	3,92	38,0	39,2	37,5	33,1	37,0		0,400	9,8	9,8												
				2000	80	7,84	33,2	33,8	32,5	27,6	31,8		0,484	46,7	16,2												
				3000	120	11,76	30,5	31,5	29,3	25,3	29,2		0,527	92,0	22,3												
				4000	160	15,68	29,0	29,5	27,5	22,2	27,1		0,561	115,0	28,0												
				5000	200	19,6	27,3	28,0	26,5	22,0	26,0		0,579	219,5	33,9												
				6000	240	23,52	26,6	27,2	25,0	21,0	25,0		0,595	241,5	39,5												
				7000	280	27,44	25,4	26,4	24,4	19,5	23,9		0,612	235,6	44,9												
				8000	320	31,36	24,6	25,6	22,5	18,0	22,7		0,632	193,2	49,6												
				9000	360	35,28	23,4	25,0	22,3	17,7	22,1		0,641	420,0	55,0												
8	1,5	670	5	Ост.							27,5		0,554			14,9	27,4										
				0	0	0	66,4	62,9	63,0	67,0	64,8		0														
				1000	40	3,92	47,0	49,5	41,4	53,0	47,7		0,264	14,9	14,9												
				2000	80	7,84	40,6	32,4	36,5	46,9	39,1		0,397	29,5	19,8												
				3000	120	11,76	36,5	29,0	31,5	43,6	35,2		0,458	64,3	25,7												
				4000	160	15,68	34,5	26,5	29,4	41,0	32,9		0,493	110,5	31,8												
				5000	200	19,6	30,5	22,4	25,6	37,4	29,0		0,553	65,6	35,4												
				6000	240	23,52	28,2	19,5	22,6	35,0	26,3		0,594	95,9	39,6												
				7000	280	27,44	23,6	16,0	19,7	32,0	22,8		0,648	72,6	42,4												
				8000	320	31,36	23,5	14,5	19,0	31,4	22,1		0,659	350,5	47,6												
9	1,5	1000	5	9000	360	35,28	22,9	13,5	18,0	30,5	21,2		0,673	290,4	52,5	18,4	23,5										
				10000	400	39,2	22,4	13,3	17,7	29,9	20,8		0,679	635,3	57,8												
				0	0	0	57,5	58,3	53,6	50,6	55,0		0														
				1000	40	3,92	44,3	46,0	43,4	39,5	43,3		0,213	18,4	18,4												
				2000	80	7,84	39,6	40,5	38,6	34,5	38,3		0,304	43,2	25,8												
				3000	120	11,76	35,2	36,0	33,6	30,5	33,8		0,385	48,2	30,5												
				4000	160	15,68	31,3	32,2	30,0	27,0	30,1		0,452	58,3	34,7												
				5000	200	19,6	28,5	30,7	28,0	25,0	28,1		0,490	103,9	40,0												
				6000	240	23,52	27,4	28,2	26,2	23,0	26,2		0,524	116,5	44,9												
				7000	280	27,44	25,8	27,0	25,0	22,3	25,0		0,545	183,5	50,3												
				8000	320	31,36	24,8	26,0	24,3	21,0	24,0		0,563	215,6	55,7												
				9000	360	35,28	24,3	24,7	23,0	19,8	23,0		0,583	200,6	60,5												
				10000	400	39,2	23,4	24,3	22,9	19,5	22,5		0,590	513,3	66,4												

Продовження табл. Б.4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
10	2	330	5	0	0	0	67,8	70,0	67,4	63,0	67,1		0			9,8	3,9										
				1000	40	3,92	39,3	41,8	42,0	38,0	40,3		0,399	9,8	9,8												
				2000	80	7,84	35,0	37,8	37,9	33,5	36,1		0,462	62,2	17,0												
				3000	120	11,76	32,4	35,5	35,4	30,5	33,5		0,501	101,1	23,5												
				4000	160	15,68	30,3	32,0	33,0	28,3	30,9		0,539	103,1	29,1												
				5000	200	19,6	28,3	31,5	31,5	26,7	29,5		0,560	187,7	35,0												
				6000	240	23,52	27,1	30,2	30,0	25,4	28,2		0,580	198,4	40,6												
				7000	280	27,44	26,1	29,0	29,1	24,0	27,1		0,597	233,6	46,0												
				8000	320	31,36	24,3	28,2	27,3	22,0	25,5		0,620	164,3	50,5												
				9000	360	35,28	23,3	23,6	26,3	21,0	23,6		0,649	138,3	54,4												
				10000	400	39,2	20,3	21,6	25,0	20,0	21,7		0,676	144,0	58,0												
11	2	670	5	0	0	0	61,7	61,3	60,7	58,9	60,7		0			13,9	3,9										
				1000	40	3,92	44,5	46,2	44,2	39,5	43,6		0,281	13,9	13,9												
				2000	80	7,84	39,7	41,6	39,3	33,3	38,5		0,366	46,4	21,4												
				3000	120	11,76	36,5	38,4	36,0	30,9	35,5		0,415	78,6	28,3												
				4000	160	15,68	33,6	35,5	33,0	28,0	32,5		0,464	81,3	33,8												
				5000	200	19,6	31,8	33,5	30,7	25,6	30,4		0,499	111,9	39,3												
				6000	240	23,52	29,6	31,3	28,5	22,6	28,0		0,538	99,1	43,7												
				7000	280	27,44	27,0	29,0	26,5	20,5	25,8		0,575	105,7	47,7												
				8000	320	31,36	25,3	27,0	24,2	18,3	23,7		0,609	116,0	51,5												
				9000	360	35,28	24,0	26,5	23,3	17,5	22,8		0,624	271,7	56,6												
				10000	400	39,2	23,7	25,3	23,0	16,7	22,2		0,634	365,8	61,8												
12	2	1000	5	0	0	0	57,7	60,5	61,5	58,0	59,4		0			15,7	19,6										
				1000	40	3,92	42,4	45,3	47,4	43,3	44,6		0,249	15,7	15,7												
				2000	80	7,84	36,2	39,1	41,2	36,2	38,2		0,358	36,3	21,9												
				3000	120	11,76	32,3	35,4	37,3	33,9	34,7		0,416	67,5	28,3												
				4000	160	15,68	27,7	30,6	32,9	28,8	30,0		0,495	49,3	31,7												
				5000	200	19,6	24,3	27,5	29,3	25,5	26,7		0,552	69,5	35,5												
				6000	240	23,52	22,5	25,4	27,5	23,5	24,7		0,584	122,3	40,3												
				7000	280	27,44	21,3	24,2	26,3	22,9	23,7		0,602	217,7	45,6												
				8000	320	31,36	20,4	23,5	25,2	21,5	22,7		0,619	227,3	50,7												
				9000	360	35,28	19,8	22,6	24,5	21,6	22,1		0,628	443,7	56,2												
				10000	400	39,2	19,0	22,5	24,1	19,0	21,2		0,644	238,9	60,9												

Продовження табл. Б.4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
13	0	165	5	0	0	0	58,5	60,8	61,5	56,8	59,4		0			18,9	3,9	78,0	73,3	67,0	68,0	71,6	0			25,2	7,8
				1000	40	3,92	48,2	40,7	44,2	55,3	47,1		0,207	18,9	18,9			67,0	62,3	55,4	57,0	60,4	0,156	25,2	25,2		
				2000	80	7,84	43,7	36,6	39,7	50,7	42,7		0,282	52,6	27,8			60,0	54,3	46,5	49,0	52,5	0,267	35,2	29,3		
				3000	120	11,76	39,8	32,3	35,9	46,4	38,6		0,35	57,1	33,6			55,5	49,0	41,5	44,8	47,7	0,334	59,1	35,3		
				4000	160	15,68	37,2	29,4	32,4	43,8	35,7		0,399	80,3	39,3			51,5	44,5	36,8	40,0	43,2	0,396	62,3	39,6		
				5000	200	19,6	35,1	26,7	29,7	41,8	33,3		0,439	98,0	44,6			49,4	42,0	32,6	37,4	40,4	0,436	98,4	44,9		
				6000	240	23,52	32,0	24,5	28,2	39,0	30,9		0,479	97,0	49,1			44,5	36,5	27,5	31,8	35,1	0,510	53,2	46,1		
				7000	280	27,44	31,3	22,1	26,9	37,8	29,5		0,503	166,3	54,6			40,5	32,5	24,0	27,5	31,1	0,565	71,0	48,6		
				8000	320	31,36	29,8	21,9	24,7	37,3	28,4		0,521	211,7	60,1			37,5	29,5	20,5	24,5	28,0	0,609	89,8	51,5		
				9000	360	35,28	29,2	19,8	24,0	35,6	27,2		0,543	182,6	65,0			36,4	27,7	19,7	23,4	26,8	0,626	233,8	56,4		
				10000	400	39,2	27,6	19,4	23,1	34,9	26,3		0,558	258,7	70,2			22,5	28,0	18,5	22,7	22,9	0,680	72,4	57,7		
14	0	335	5	0	0	0	51,3	54,4	64,4	64,4	58,6		0			51,6	23,5	78,5	75,2	73,0	73,0	74,9	0			54,4	7,8
				1000	40	3,92	46,5	50,9	60,6	58,7	54,2		0,076	51,6	51,6			76,5	70,4	65,7	65,5	69,5	0,072	54,4	54,4		
				2000	80	7,84	42,2	47,5	56,6	53,8	50,0		0,147	55,4	53,4			56,5	50,0	42,5	45,6	48,7	0,351	14,1	22,4		
				3000	120	11,76	38,4	42,9	53,5	50,2	46,3		0,211	60,9	55,7			53,7	47,0	39,0	42,9	45,7	0,391	97,9	30,1		
				4000	160	15,68	33,8	39,3	49,6	46,1	42,2		0,28	56,7	56,0			52,0	44,5	35,5	39,8	43,0	0,427	108,8	36,7		
				5000	200	19,6	29,2	32,5	43,9	42,9	37,1		0,367	45,3	53,4			37,2	28,4	20,0	24,3	27,5	0,633	19,0	30,9		
				6000	240	23,52	24,1	28,6	39,5	38,5	32,7		0,443	51,6	53,1			35,0	26,4	18,7	21,7	25,5	0,660	145,0	35,6		
				7000	280	27,44	22,4	26,4	37,9	34,0	30,2		0,485	91,9	56,5			33,5	25,5	16,2	20,5	23,9	0,681	192,6	40,3		
				8000	320	31,36	20,6	24,5	35,4	33,0	28,4		0,516	127,7	60,8			32,4	24,1	14,5	18,5	22,4	0,701	189,5	44,7		
				9000	360	35,28	19,4	23,8	33,6	31,6	27,1		0,538	180,2	65,6			31,5	23,3	12,5	18,2	21,4	0,715	293,7	49,4		
				10000	400	39,2	18,1	21,4	31,3	30,0	25,2		0,57	121,0	68,8			31,0	22,5	13,0	18,0	21,1	0,718	1175	54,6		
15	0	500	5	0	0	0	71,6	72,0	72,6	72,4	72,2		0			31,0	19,6	64,5	62,6	58,5	59,5	61,3	0			51,7	15,7
				1000	40	3,92	63,6	61,0	61,9	65,6	63,0		0,126	31,0	31,0			60,3	53,4	53,5	59,3	56,6	0,076	51,7	51,7		
				2000	80	7,84	60,9	57,4	58,9	63,3	60,1		0,167	97,5	47,0			58,5	48,9	51,3	58,9	54,4	0,112	108,0	69,9		
				3000	120	11,76	57,4	54,3	55,7	60,1	56,9		0,212	87,0	55,5			56,7	47,3	49,6	57,0	52,7	0,141	137,3	83,5		
				4000	160	15,68	39,5	37,2	38,8	46,6	40,5		0,438	17,3	35,8			55,5	45,5	47,5	55,0	50,9	0,170	135,3	92,4		
				5000	200	19,6	28,6	28,2	32,8	36,6	31,6		0,563	31,5	34,8												
				6000	240	23,52	26,8	27,0	30,5	31,7	29,0		0,598	110,9	39,3												
				7000	280	27,44	24,3	25,0	29,4	30,8	27,4		0,621	174,0	44,2												
				8000	320	31,36	24,2	24,5	28,2	29,2	26,5		0,632	332,7	49,6												
				9000	360	35,28	23,1	23,2	27,4	27,5	25,3		0,649	230,9	54,3												
				10000	400	39,2	22,3	22,7	26,8	27,1	24,7		0,657	491,9	59,6			24,8	15,0	16,9	24,5	20,3	0,669	47,1	58,6		

Продовження табл. Б.4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
16	0	750	5	0	0	0	73,3	62,4	61,7	68,0	66,4		0			69,4	11,8										
				500	20	1,96	68,0	58,5	57,0	63,5	61,8		0,069	28,3	28,3												
				1000	40	3,92	66,0	57,0	55,4	61,1	59,9		0,098	69,4	40,2												
				1500	60	5,88	64,0	55,4	53,3	59,0	57,9		0,127	66,7	46,3												
				2000	80	7,84	62,2	53,3	51,4	57,4	56,1		0,155	70,3	50,6												
				2500	100	9,8	51,6	43,0	41,0	46,2	45,5		0,315	12,2	31,1												
				3000	120	11,76	39,7	31,0	29,3	35,3	33,8		0,49	11,2	24,0												
				4000	160	15,68	34,8	25,5	24,5	30,0	28,7		0,567	50,7	27,6												
				5000	200	19,6	32,5	23,8	21,9	27,9	26,5		0,6	119,6	32,7												
				6000	240	23,52	30,4	22,4	21,0	25,4	24,8		0,626	150,8	37,6												
				7000	280	27,44	30,1	21,4	19,6	25,3	24,1		0,637	371,6	43,1												
				8000	320	31,36	29,8	20,9	18,9	24,9	23,6		0,644	547,6	48,7												
				9000	360	35,28	28,5	20,0	18,5	24,3	22,8		0,656	325,1	53,8												
				10000	400	39,2	28,3	19,8	18,3	23,9	22,6		0,66	1040,4	59,4												
17	0	1000	5	0	0	0	65,6	58,6	53,6	57,7	58,9		0			72,1	9,8										
				500	20	1,96	63,7	56,0	51,5	56,0	56,8		0,035	55,6	55,6												
				1000	40	3,92	62,0	54,6	49,9	54,3	55,2		0,062	72,1	62,8												
				1500	60	5,88	60,6	53,5	47,7	52,5	53,6		0,09	71,0	65,3												
				2000	80	7,84	59,3	51,5	45,4	50,5	51,7		0,122	60,7	64,1												
				2500	100	9,8	41,0	34,0	28,5	33,0	34,1	тріщ.	0,42	6,6	23,3												
				3000	120	11,76	39,0	32,0	26,5	30,9	32,1		0,455	57,0	25,9												
				4000	160	15,68	35,4	27,0	24,0	28,0	28,6		0,514	65,9	30,5												
				5000	200	19,6	34,0	26,4	20,7	25,2	26,6		0,549	114,0	35,7												
				6000	240	23,52	32,0	24,4	19,0	23,4	24,7		0,58	123,1	40,5												
				7000	280	27,44	31,3	23,5	18,0	22,4	23,8		0,596	256,4	46,1												
				8000	320	31,36	30,5	22,6	16,7	21,6	22,9		0,612	242,9	51,3												
				9000	360	35,28	29,7	21,7	16,0	20,5	22,0		0,627	263,8	56,3												
				10000	400	39,2	29,3	21,5	15,9	20,4	21,8		0,63	1154	62,2												

Продовження табл. Б.4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
18	1	165	5	0	0	0	79,8	27,7	80,0	82,4	67,5		0			26,0	7,8	65,9	66,2	69,5	70,0	67,9	0			19,0	7,8
				1000	40	3,92	56,6	52,3	56,8	63,5	57,3		0,151	26,0	26,0			46,7	47,4	49,9	50,4	48,6	0,207	19,0	19,0		
				2000	80	7,84	48,9	44,9	49,5	57,0	50,1		0,258	36,6	30,4			40,5	41,0	43,4	44,8	42,4	0,308	38,9	25,5		
				3000	120	11,76	44,9	40,4	44,9	52,2	45,6		0,324	59,1	36,3			36,9	37,5	39,6	40,5	38,6	0,370	63,2	31,8		
				4000	160	15,68	40,5	37,1	41,2	48,7	41,9		0,379	71,0	41,3			33,0	33,3	36,5	37,5	35,1	0,428	67,7	36,7		
				5000	200	19,6	38,9	34,1	38,9	46,1	39,5		0,415	111,4	47,3			31,5	32,2	34,2	35,5	33,4	0,456	139,2	43,0		
				6000	240	23,52	36,0	32,0	36,8	44,1	37,2		0,448	116,3	52,5			29,8	29,8	32,5	33,3	31,4	0,488	120,1	48,2		
				7000	280	27,44	33,4	27,7	33,3	41,4	34,0		0,497	80,8	55,2			26,5	27,2	29,6	30,7	28,5	0,535	84,3	51,3		
				8000	320	31,36	30,9	25,9	30,9	39,2	31,7		0,53	118,9	59,2			26,4	26,3	28,6	30,0	27,8	0,546	355,8	57,4		
				9000	360	35,28	27,5	28,8	29,0	37,5	30,7		0,545	258,1	64,7			24,0	23,5	27,0	28,0	25,6	0,582	109,2	60,6		
				10000	400	39,2	27,3	21,8	26,8	35,2	27,8		0,588	90,4	66,6			24,0	23,5	25,8	27,4	25,2	0,589	533,8	66,5		
19	1	335	5	0	0	0	74,9	68,5	66,3	72,8	70,6		0			22,2	19,6	65,3	65,5	62,4	62,4	63,9	0			29,0	19,6
				1000	40	3,92	59,2	54,3	55,4	63,7	58,2		0,177	22,2	22,2			57,0	56,5	54,0	53,6	55,3	0,135	29,0	29,0		
				2000	80	7,84	53,6	47,3	51,0	61,0	53,2		0,246	56,2	31,8			52,5	52,0	49,6	49,6	50,9	0,203	57,6	38,6		
				3000	120	11,76	50,2	43,9	48,3	57,7	50,0		0,292	86,5	40,3			49,0	48,5	46,0	45,0	47,1	0,263	65,9	44,8		
				4000	160	15,68	45,8	39,1	42,8	54,3	45,5		0,356	61,2	44,1			37,0	37,0	34,5	33,7	35,6	0,444	21,6	35,3		
				5000	200	19,6	34,5	27,8	31,8	42,7	34,2		0,516	24,5	38,0			33,0	33,6	30,5	30,4	31,9	0,501	68,2	39,1		
				6000	240	23,52	31,3	24,5	28,3	39,8	31,0		0,561	85,8	41,9			30,6	30,6	28,5	28,0	29,4	0,540	102,2	43,6		
				7000	280	27,44	29,8	22,5	26,8	37,0	29,0		0,589	142,0	46,6			28,8	29,6	26,8	26,9	28,0	0,561	178,9	48,9		
				8000	320	31,36	28,4	20,7	25,2	36,1	27,6		0,609	194,3	51,5			27,4	28,0	25,4	25,1	26,5	0,586	161,6	53,5		
				9000	360	35,28	25,9	19,3	22,7	33,8	25,4		0,64	127,3	55,1			25,6	26,4	24,8	24,0	25,2	0,606	196,5	58,3		
				10000	400	39,2	27,1	20,8	20,2	33,4	25,4		0,641	5537,0	61,2			25,0	25,6	24,5	23,4	24,6	0,615	435,6	63,8		
20	1	500	5	0	0	0	68,9	67,2	67,2	69,6	68,2		0			21,4	15,7	64,6	65,4	60,5	66,4	64,2	0			31,0	19,6
				1000	40	3,92	56,4	50,1	52,6	63,8	55,7		0,183	21,4	21,4			57,0	56,9	51,0	59,5	56,1	0,127	31,0	31,0		
				2000	80	7,84	53,3	45,6	49,7	60,2	52,2		0,235	75,9	33,4			51,0	39,9	43,8	50,9	46,4	0,278	26,0	28,2		
				3000	120	11,76	48,8	41,4	44,8	55,9	47,7		0,3	59,8	39,1			48,0	36,5	40,0	48,6	43,3	0,326	80,6	36,1		
				4000	160	15,68	35,3	28,7	31,3	43,4	34,7		0,492	20,5	31,9			39,5	37,8	32,4	40,0	37,4	0,417	43,0	37,6		
				5000	200	19,6	32,5	25,5	27,8	40,3	31,5		0,538	84,9	36,4			36,5	23,9	27,4	35,0	30,7	0,522	37,4	37,5		
				6000	240	23,52	30,4	23,4	26,7	36,8	29,3		0,57	121,6	41,3			33,4	21,5	25,0	34,0	28,5	0,557	113,2	42,3		
				7000	280	27,44	27,6	20,8	24,2	35,3	27,0		0,605	113,8	45,4			31,0	19,5	23,5	32,0	26,5	0,587	127,5	46,7		
				8000	320	31,36	26,7	19,3	23,5	34,2	25,9		0,62	254,7	50,6			30,0	18,5	22,0	31,0	25,4	0,605	223,8	51,8		
				9000	360	35,28	25,8	18,5	22,7	33,3	25,1		0,632	314,6	55,8			29,9	17,5	21,4	30,0	24,7	0,615	373,0	57,3		
				10000	400	39,2	24,6	17,8	21,7	32,9	24,3		0,645	324,2	60,8			29,5	16,5	20,0		22,0	0,657	93,2	59,6		

Продовження табл. Б.4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
21	1	750	5	0	0	0	64,5	57,5	53,6	58,4	58,5		0			21,9	7,8										
				500	20	1,96	57,0	49,0	45,9	51,0	50,7		0,133	14,7	14,7												
				1000	40	3,92	54,4	46,5	43,0	48,3	48,1		0,179	42,9	21,9												
				1500	60	5,88	51,0	43,8	40,0	45,0	45,0		0,232	37,0	25,4												
				2000	80	7,84	42,4	34,0	30,5	35,5	35,6		0,391	12,3	20,0												
				2500	100	9,8	39,0	31,0	27,5	33,0	32,6		0,442	38,5	22,2												
				3000	120	11,76	36,9	29,4	25,5	31,0	30,7		0,475	59,6	24,7												
				4000	160	15,68	34,0	26,5	23,0	28,0	27,9		0,524	81,2	30,0												
				5000	200	19,6	32,0	24,5	21,0	26,4	26,0		0,556	120,7	35,3												
				6000	240	23,52	31,0	23,4	20,0	25,5	25,0		0,573	229,3	41,0												
				7000	280	27,44	29,6	23,0	19,0	23,6	23,8		0,593	195,2	46,3												
				8000	320	31,36	29,5	21,5	18,5	23,5	23,3		0,603	416,9	52,0												
22	1	1000	5	9000	360	35,28	29,0	21,0	18,0	24,4	23,1		0,605	1528,8	58,3	31,5	9,8										
				10000	400	39,2	28,0	20,9	17,5	23,5	22,5		0,616	366,9	63,7												
				0	0	0	64,5	67,5	66,4	64,5	65,7		0														
				500	20	1,96	58,0	61,0	60,5	59,4	59,7		0,091	21,5	21,5												
				1000	40	3,92	56,0	58,3	58,4	57,5	57,6		0,124	59,2	31,5												
				1500	60	5,88	54,5	57,0	57,0	53,6	55,5		0,155	63,6	37,9												
				2000	80	7,84	52,9	55,0	55,6	34,0	49,4		0,249	20,9	31,5												
				2500	100	9,8	32,5	34,3	34,4	33,8	33,8	тріщ.	0,486	8,2	20,1												
				3000	120	11,76	30,0	31,0	31,7	31,0	30,9		0,529	45,6	22,2												
				4000	160	15,68	27,0	28,5	28,0	28,0	27,9		0,576	84,5	27,2												
				5000	200	19,6	25,5	26,5	26,5	26,5	26,3		0,601	158,5	32,6												
				6000	240	23,52	24,5	25,5	25,5	25,0	25,1		0,618	229,0	38,1												
				7000	280	27,44	23,6	25,5	25,0	24,4	24,6		0,625	515,3	43,9												
				8000	320	31,36	23,0	24,5	23,5	23,5	23,6		0,641	257,6	49,0												
				9000	360	35,28	22,5	23,5	23,0	23,0	23,0		0,650	412,2	54,3												
				10000	400	39,2	22,4	23,0	22,4	22,3	22,5		0,657	542,4	59,6												

Продовження табл. Б.4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
23	1,5	165	5	0	0	0	76,5	69,0	73,2	78,5	74,3		0			14,9	3,9	73,5	66,5	62,0	66,5	67,1	0			15,3	7,8
				1000	40	3,92	50,8	44,2	47,8	58,3	50,3		0,263	14,9	14,9			57,0	48,0	44,9	50,0	50,0	0,255	15,3	15,3		
				2000	80	7,84	45,1	38,3	41,6	52,3	44,3		0,35	44,9	22,4			50,5	42,0	38,0	43,5	43,5	0,352	40,6	22,3		
				3000	120	11,76	41,3	33,6	37,2	48,6	40,2		0,411	64,4	28,6			46,0	38,0	34,0	39,8	39,5	0,412	65,0	28,5		
				4000	160	15,68	38,7	31,6	34,6	45,5	37,6		0,449	103,9	34,9			43,6	33,5	30,5	36,0	35,9	0,465	74,1	33,7		
				5000	200	19,6	36,3	29,2	33,1	43,7	35,6		0,479	132,1	41,0			40,5	30,6	27,5	33,0	32,9	0,510	87,7	38,4		
				6000	240	23,52	34,8	26,7	30,7	41,4	33,4		0,51	123,0	46,1			37,5	30,0	25,5	31,0	31,0	0,538	138,5	43,7		
				7000	280	27,44	33,2	25,1	29,4	40,1	32,0		0,532	184,4	51,6			36,4	27,0	23,5	29,1	29,0	0,568	131,6	48,3		
				8000	320	31,36	30,5	22,9	26,7	37,2	29,3		0,57	101,9	55,0			34,3	25,5	21,5	27,5	27,2	0,595	146,2	52,7		
				9000	360	35,28	24,6	17,3	21,4	32,0	23,8		0,651	48,6	54,2			32,4	23,5	19,0	25,3	25,1	0,627	122,4	56,3		
				10000	400	39,2	23,8	16,4	20,7	31,3	23,1		0,662	345,1	59,2			30,5	21,5	17,3	23,5	23,2	0,654	142,2	59,9		
24	1,5	330	5	0	0	0	73,0	69,4	73,6	74,5	72,6		0			16,9	19,6	68,5	63,0	55,4	58,5	61,4	0			20,1	19,6
				1000	40	3,92	56,9	49,3	53,2	63,7	55,8		0,232	16,9	16,9			57,0	50,5	43,1	47,0	49,4	0,195	20,1	20,1		
				2000	80	7,84	52,2	44,2	48,1	59,5	51,0		0,298	59,6	26,3			51,5	44,4	36,5	41,0	43,4	0,293	39,8	26,7		
				3000	120	11,76	48,1	39,8	43,9	55,8	46,9		0,354	69,4	33,2			47,0	39,6	32,0	36,0	38,7	0,370	51,2	31,8		
				4000	160	15,68	43,0	34,9	38,6	50,3	41,7		0,426	54,7	36,8			43,0	35,5	27,0	31,0	34,1	0,444	53,1	35,3		
				5000	200	19,6	28,6	21,0	24,0	36,0	27,4		0,623	19,9	31,5			38,5	29,5	22,0	16,0	26,5	0,568	31,5	34,5		
				6000	240	23,52	27,1	18,8	23,7	34,5	26,0		0,642	207,0	36,7			32,4	25,0	17,4	21,9	24,2	0,606	103,4	38,8		
				7000	280	27,44	23,3	15,6	19,7	32,4	22,8		0,687	86,9	40,0			31,2	23,5	16,0	20,0	22,7	0,630	160,3	43,5		
				8000	320	31,36	22,8	14,6	19,1	31,2	21,9		0,698	345,1	44,9			31,0	22,5	15,0	19,0	21,9	0,643	300,6	48,7		
				9000	360	35,28	22,2	13,9	18,8	30,8	21,4		0,705	569,4	50,0			30,0	21,0	13,9	18,9	21,0	0,659	260,0	53,6		
				10000	400	39,2	21,7	12,9	17,1	29,1	20,2		0,722	232,4	54,3			29,0	20,6	13,0	17,5	20,0	0,674	260,0	58,2		
25	1,5	500	5	0	0	0	71,0	63,9	67,4	78,0	70,1		0			27,1	7,8	64,3	65,5	60,0	64,5	63,6	0			29,1	15,7
				1000	40	3,92	60,9	53,6	57,1	68,1	59,9		0,145	27,1	27,1			62,0	55,0	49,0	54,0	55,0	0,135	29,1	29,1		
				2000	80	7,84	55,6	48,0	52,0	63,5	54,8		0,218	53,3	35,9			55,8	48,0	42,0	46,5	48,1	0,244	36,0	32,2		
				3000	120	11,76	30,5	23,1	26,1	37,9	29,4		0,580	10,8	20,3			42,5	35,4	30,9	34,8	35,9	0,435	20,5	27,0		
				4000	160	15,68	28,6	20,8	25,1	35,5	27,5		0,608	144,6	25,8			36,5	29,4	24,5	29,0	29,9	0,530	41,2	29,6		
				5000	200	19,6	26,9	19,0	23,3	34,2	25,9		0,631	166,5	31,1			34,0	26,5	22,0	26,0	27,1	0,573	91,5	34,2		
				6000	240	23,52	25,9	17,6	21,9	33,0	24,6		0,649	219,8	36,2			32,0	25,4	20,0	24,5	25,5	0,599	151,0	39,2		
				7000	280	27,44	25,1	16,5	20,8	32,2	23,7		0,663	289,2	41,4			31,0	23,5	19,0	22,3	24,0	0,623	163,4	44,0		
				8000	320	31,36	23,6	15,4	19,6	31,3	22,5		0,679	233,8	46,2			30,8	23,3	18,0	22,0	23,5	0,630	586,4	49,8		
				9000	360	35,28	23,8	15,2	19,1	30,9	22,3		0,682	1220,9	51,7			29,5	21,5	17,0	21,5	22,4	0,648	216,7	54,4		
				10000	400	39,2	23,0	14,1	18,8	29,7	21,4		0,695	323,2	56,4			28,9	20,5	17,0	20,8	21,8	0,657	433,4	59,7		

Продовження табл. Б.4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28		
26	1,5	750	5	0	0	0	66,0	66,9	64,0	64,0	65,2		0			35,4	5,9												
				500	20	1,96	60,8	62,0	58,4	58,4	59,9		0,082	24,0	24,0														
				1000	40	3,92	58,6	59,5	57,2	56,7	58,0		0,111	67,3	35,4														
				1500	60	5,88	57,0	58,0	55,5	55,0	56,4	руйн.	0,136	78,7	43,3														
				2000	80	7,84																							
				2500	100	9,8																							
				3000	120	11,76																							
				4000	160	15,68																							
				5000	200	19,6																							
				6000	240	23,52																							
				7000	280	27,44																							
				8000	320	31,36																							
				9000	360	35,28																							
				10000	400	39,2																							
27	1,5	1000	5	0	0	0	63,3	53,5	59,3	67,3	60,9		0			33,0	9,8												
				500	20	1,96	58,3	47,6	53,6	61,5	55,3		0,092	21,3	21,3														
				1000	40	3,92	57,0	46,0	51,5	60,0	53,6		0,119	73,4	33,0														
				1500	60	5,88	56,0	44,0	49,0	55,5	51,1		0,160	47,7	36,8														
				2000	80	7,84	53,0	40,0	45,4	55,0	48,4		0,205	43,0	38,2														
				2500	100	9,8	37,0	25,4	30,5	39,4	33,1	тріщ.	0,456	7,8	21,5														
				3000	120	11,76	35,5	23,5	28,4	37,3	31,2		0,488	62,8	24,1														
				4000	160	15,68	30,4	18,8	24,0	32,4	26,4		0,566	50,0	27,7														
				5000	200	19,6	28,0	16,6	22,0	30,5	24,3		0,601	112,3	32,6														
				6000	240	23,52	27,5	16,0	21,5	29,5	23,6		0,612	367,0	38,4														
				7000	280	27,44	27,0	14,9	19,5	28,0	22,4		0,633	187,1	43,4														
				8000	320	31,36	26,4	14,3	19,3	27,4	21,9		0,641	477,1	48,9														
				9000	360	35,28	26,0	14,0	18,5	27,4	21,5		0,647	636,1	54,5														
				10000	400	39,2	25,0	13,5	18,4	27,0	21,0		0,655	477,1	59,8														

Продовження табл. Б.4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
28	2	165	5	0	0	0	79,9	72,7	75,5	85,5	78,4		0			10,8	3,9	68,5	73,5	74,5	72,3	72,2	0			13,4	3,9
				1000	40	3,92	51,6	44,0	47,4	57,1	50,0		0,362	10,8	10,8			55,4	43,5	48,4	57,0	51,1	0,293	13,4	13,4		
				2000	80	7,84	46,3	39,1	42,2	52,2	45,0		0,427	60,6	18,4			48,4	37,0	43,0	51,0	44,9	0,379	45,5	20,7		
				3000	120	11,76	42,9	37,7	37,6	48,2	41,6		0,469	91,7	25,1			45,0	33,0	39,6	47,0	41,2	0,430	76,5	27,3		
				4000	160	15,68	40,2	32,4	34,8	45,5	38,2		0,512	91,1	30,6			40,5	30,0	36,0	44,0	37,6	0,479	80,3	32,7		
				5000	200	19,6	38,1	29,9	32,7	43,4	36,0		0,540	139,7	36,3			38,9	28,0	33,5	41,7	35,5	0,508	134,8	38,6		
				6000	240	23,52	36,0	28,2	31,5	42,1	34,5		0,561	195,1	42,0			36,5	25,5	32,0	40,0	33,5	0,536	139,8	43,9		
				7000	280	27,44	34,5	26,4	29,5	40,4	32,7		0,583	175,6	47,1			35,5	23,5	30,0	38,0	31,8	0,560	161,7	49,0		
				8000	320	31,36	33,5	24,3	27,8	38,6	31,1		0,604	186,3	51,9			33,0	21,8	27,5	36,0	29,6	0,590	130,1	53,1		
				9000	360	35,28	25,6	16,4	19,6	31,6	23,3		0,703	39,7	50,2			31,5	18,7	24,3	32,0	26,6	0,631	95,9	55,9		
				10000	400	39,2	24,7	16,2	19,3	30,6	22,7		0,710	512,2	55,2			28,5	16,7	23,0	30,4	24,7	0,659	143,3	59,5		
29	2	330	5	0	0	0	69,4	60,5	64,1	76,9	67,7		0			13,5	15,7	69,9	63,5	57,1	69,0	64,9	0			23,2	7,8
				1000	40	3,92	57,0	49,8	51,9	63,9	55,7		0,290	13,5	13,5			64,7	50,5	54,0	46,5	53,9	0,169	23,2	23,2		
				2000	80	7,84	52,6	44,5	47,8	59,3	51,1		0,349	66,8	22,5			48,5	43,4	37,9	39,9	42,4	0,346	22,1	22,7		
				3000	120	11,76	48,2	39,7	43,2	55,1	46,6		0,406	68,3	28,9			44,5	40,0	33,5	36,0	38,5	0,407	64,8	28,9		
				4000	160	15,68	28,0	19,7	24,6	35,8	27,0		0,655	15,7	23,9			41,0	36,0	29,6	32,4	34,8	0,464	67,8	33,8		
				5000	200	19,6	26,9	18,0	22,6	34,2	25,4		0,676	192,1	29,0			36,5	31,0	25,0	27,7	30,1	0,537	54,1	36,5		
				6000	240	23,52	23,1	14,6	18,5	31,4	21,9		0,721	87,2	32,6			34,3	28,8	22,5	24,8	27,6	0,575	103,8	40,9		
				7000	280	27,44	21,0	13,0	17,4	30,3	20,4		0,739	208,4	37,1			31,5	25,8	19,8	21,5	24,7	0,620	86,2	44,3		
				8000	320	31,36	20,1	11,5	17,2	28,8	19,4		0,753	299,8	41,7			30,0	24,5	18,6	20,6	23,4	0,639	207,6	49,1		
				9000	360	35,28	19,3	10,9	15,5	28,7	18,6		0,763	384,2	46,3			29,0	23,6	18,0	20,3	22,7	0,650	363,3	54,3		
				10000	400	39,2	19,2	10,3	15,3	27,2	18,0		0,770	512,2	50,9			28,5	22,0	17,4	19,7	21,9	0,662	308,3	59,2		
30	2	500	5	0	0	0	74,8	68,6	73,6	78,0	73,8		0			20,6	11,8	67,4	60,0	62,0	66,7	64,0	0			20,4	15,7
				1000	40	3,92	52,6	58,4	65,8	62,0	59,7		0,191	20,6	20,6			57,0	48,0	48,0	54,0	51,8	0,192	20,4	20,4		
				2000	80	7,84	47,0	52,5	60,6	56,0	54,0		0,267	50,9	29,3			51,0	42,4	41,4	47,4	45,6	0,289	40,5	27,2		
				3000	120	11,76	27,2	32,6	40,3	35,0	33,8		0,542	14,3	21,7			46,0	36,5	35,5	42,0	40,0	0,375	45,2	31,3		
				4000	160	15,68	23,5	28,2	37,0	32,9	30,4		0,588	85,7	26,7			34,4	25,0	24,5	30,5	28,6	0,553	22,0	28,3		
				5000	200	19,6	20,7	25,9	33,9	31,4	28,0		0,621	119,2	31,6			31,0	22,5	21,5	27,4	25,6	0,600	83,7	32,7		
				6000	240	23,52	18,9	24,2	32,6	27,8	25,9		0,649	137,7	36,2			29,5	20,5	19,8	25,4	23,8	0,628	139,4	37,4		
				7000	280	27,44	17,7	22,9	31,8	27,0	24,9		0,663	282,0	41,4			28,5	19,0	18,6	24,3	22,6	0,647	209,1	42,4		
				8000	320	31,36	16,2	22,7	29,8	24,2	23,2		0,685	177,9	45,8			27,3	18,9	18,3	24,0	22,1	0,654	528,4	47,9		
				9000	360	35,28	15,9	21,2	29,1	24,2	22,6		0,694	462,6	50,9			16,7	18,0	17,0	22,5	18,6	0,710	70,2	49,7		
				10000	400	39,2	15,3	20,4	28,8	24,0	22,1		0,700	608,6	56,0			16,4	17,5	16,7	21,5	18,0	0,718	478,1	54,6		

Продовження табл. Б.4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
31	2	750	5	0	0	0	66,0	57,4	55,5	61,3	60,05		0			31,9	11,8										
				500	20	1,96	60,5	52,0	49,9	55,6	54,5		0,092	21,2	21,2												
				1000	40	3,92	59,0	50,0	47,7	54,0	52,68		0,123	64,5	31,9												
				1500	60	5,88	57,5	49,0	46,0	52,5	51,25		0,147	82,6	40,1												
				2000	80	7,84	55,6	47,0	44,0	50,7	49,33		0,179	61,1	43,9												
				2500	100	9,8	51,0	41,2	38,0	43,8	43,5		0,276	20,2	35,6												
				3000	120	11,76	34,5	26,5	24,0	30,0	28,75	тріщ.	0,521	8,0	22,6												
				4000	160	15,68	32,0	23,4	21,0	27,0	25,85		0,570	81,2	27,5												
				5000	200	19,6	30,3	22,0	19,0	25,4	24,18		0,597	140,5	32,8												
				6000	240	23,52	29,0	20,5	18,0	23,7	22,8		0,620	171,2	37,9												
				7000	280	27,44	28,0	19,5	17,0	23,5	22,0		0,634	294,2	43,3												
				8000	320	31,36	27,5	18,5	16,4	22,4	21,2		0,647	294,2	48,5												
				9000	360	35,28	27,0	18,0	15,6	22,3	20,73		0,655	495,6	53,9												
				10000	400	39,2	26,0	18,0	15,4	21,8	20,3		0,662	553,9	59,2												
32	2	1000	5	0	0	0	68,4	66,0	62,4	63,0	65,0		0			36,6	9,8										
				500	20	1,96	63,6	61,5	56,5	58,0	59,9		0,078	25,2	25,2												
				1000	40	3,92	61,9	60,0	54,6	55,5	58,0		0,107	67,0	36,6												
				1500	60	5,88	60,0	58,0	52,5	54,0	56,1		0,136	67,9	43,3												
				2000	80	7,84	58,5	55,5	50,3	51,5	54,0		0,169	58,5	46,3												
				2500	100	9,8	39,0	32,4	24,6	28,4	31,1	тріщ.	0,521	5,6	18,8												
				3000	120	11,76	36,0	30,0	22,5	25,4	28,5		0,562	48,5	20,9												
				4000	160	15,68	31,4	26,0	18,5	22,3	24,6		0,622	64,9	25,2												
				5000	200	19,6	28,5	23,4	17,4	20,5	22,5		0,654	121,2	30,0												
				6000	240	23,52	28,0	22,7	16,3	19,5	21,6		0,667	308,6	35,3												
				7000	280	27,44	28,0	22,4	15,5	19,0	21,2		0,673	636,5	40,8												
				8000	320	31,36	26,3	22,0	14,8	18,4	20,4		0,686	299,5	45,7												
				9000	360	35,28	25,5	20,8	14,4	18,0	19,7		0,697	363,7	50,6												
				10000	400	39,2	25,0	20,0	14,0	17,5	19,1		0,706	462,9	55,6												

Продовження табл. Б.4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
33	0	250	5	0	0	0	57,86	55,79	51,08	53,41	54,53		0			39,1	1,96	57,94	48,46	50,08	60,21	54,2	0			63,2	15,7
				500	20	1,96	55,61	53,84	46,34	47,84	50,91		0,067	29,5	29,5			56,12	46,11	48,76	58,07	52,3	0,035	55,7	55,7		
				1000	40	3,92	53,90	52,22	44,31	45,86	49,07		0,100	58,2	39,1			54,59	44,36	47,44	56,85	50,8	0,062	73,0	63,2		
				1500	60	5,88	52,40	50,73	42,62	44,23	47,49		0,129	67,8	45,5			52,75	42,80	46,03	55,62	49,3	0,090	70,3	65,4		
				2000	80	7,84	51,07	49,44	40,98	42,55	46,01		0,156	71,9	50,1			51,53	41,30	44,87	54,39	48,0	0,114	83,1	69,1		
				2500	100	9,8	49,84	48,10	39,43	40,99	44,59		0,182	75,4	53,7			50,40	40,00	43,56	52,90	46,7	0,138	81,2	71,2		
				3000	120	11,76	48,55	46,70	37,67	39,44	43,09		0,210	71,3	56,0			48,92	38,69	42,38	51,97	45,5	0,160	86,7	73,4		
				3500	140	13,72	47,53	45,74	36,60	38,34	42,05		0,229	102,8	59,9			47,67	37,30	41,01	50,70	44,2	0,185	80,4	74,3		
				4000	160	15,68	46,34	44,44	35,17	36,78	40,68		0,254	78,2	61,7			45,74	36,22	39,60	48,45	42,5	0,215	63,7	72,8		
				4500	180	17,64	45,27	43,31	33,93	35,26	39,44		0,277	86,2	63,7			43,41	33,00	36,00	44,28	39,2	0,277	31,9	63,7		
				5000	200	19,6	43,51	41,43	31,53	32,99	37,36		0,315	51,4	62,2			39,59	29,70	33,05	42,20	36,1	0,333	35,0	58,9		
				5500	220	21,56	41,30	39,16	28,83	30,40	34,92		0,360	43,8	60,0												
				6000	240	23,52	39,61	37,41	26,58	28,42	33,01		0,395	55,7	59,6			36,94	27,36	30,70	39,65	33,7	0,379	5,2	62,1		
				6500	260	25,48	38,55	36,17	25,42	27,18	31,83		0,416	91,0	61,2												
				7000	280	27,44	37,20	35,33	24,60	26,28	30,85		0,434	109,3	63,2			35,08	25,16	28,49	36,94	31,4	0,420	4,7	65,3		
				7500	300	29,4	36,90	34,62	23,98	25,55	30,26		0,445	181,2	66,1												
				8000	320	31,36	36,36	34,03	22,52	24,93	29,46		0,460	133,2	68,2			33,64	23,33	26,87	34,73	29,6	0,453	4,3	69,3		
				8500	340	33,32	35,64	33,25	21,97	23,94	28,70		0,474	140,6	70,3												
				9000	360	35,28	35,18	32,77	20,90	23,29	28,04		0,486	160,7	72,6			32,09	22,20	25,29	34,04	28,4	0,476	4,1	74,2		
				9500	380	37,24	34,80	32,33	20,30	22,56	27,50		0,496	198,9	75,1												
				10000	400	39,2	34,20	31,77	19,90	22,18	27,01		0,505	220,4	77,7			31,37	21,31	24,58	34,37	27,9	0,485	4,0	80,9		

Продовження табл. Б.4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
34	0	500	5	0	0	0	46,88	60,96	66,69	52,55	56,77		0			84,9	9,8	48,55	46,87	43,24	44,82	45,9	0			43,2	13,72
				500	20	1,96	45,56	59,26	65,42	51,56	55,45		0,023	84,3	84,3			46,63	44,90	41,14	42,55	43,8	0,045	43,5	43,5		
				1000	40	3,92	44,64	57,98	63,64	50,34	54,15		0,046	85,6	84,9			44,31	42,74	39,12	40,68	41,7	0,091	43,0	43,2		
				1500	60	5,88	43,48	57,36	62,95	49,53	53,33		0,061	135,7	97,0			43,08	41,03	37,97	39,52	40,4	0,119	68,5	49,3		
				2000	80	7,84	42,57	56,17	61,92	48,58	52,31		0,079	109,1	99,8			42,19	40,47	36,94	38,39	39,5	0,139	99,6	56,4		
				2500	100	9,8	41,80	55,15	61,23	47,72	51,48		0,093	133,3	105,1			41,25	39,14	35,90	37,91	38,6	0,160	94,9	61,4		
				3000	120	11,76	40,73	54,13	60,11	46,63	50,40		0,112	103,5	104,8			40,20	38,36	34,92	36,54	37,5	0,182	86,0	64,5		
				3500	140	13,72	27,04	40,18	46,00	33,00	36,56		0,356	8,0	38,5			39,17	37,00	33,33	35,16	36,2	0,212	67,1	64,8		
				4000	160	15,68	25,70	39,28	45,00	31,64	35,41		0,376	96,8	41,7			36,77	34,44	30,46	32,00	33,4	0,271	32,7	57,8		
				4500	180	17,64	24,24	37,42	43,13	30,17	33,74		0,406	66,8	43,5			31,22	29,29	25,53	27,92	28,5	0,379	18,2	46,6		
				5000	200	19,6	22,80	35,83	41,69	28,66	32,25		0,432	74,4	45,4			30,72	28,16	25,00	26,94	27,7	0,396	114,5	49,5		
				5500	220	21,56	21,62	34,43	40,50	27,38	30,98		0,454	88,1	47,5												
				6000	240	23,52	20,85	34,07	39,97	26,78	30,42		0,464	196,9	50,7			27,49	26,20	22,84	24,95	25,4	0,447	4,4	52,6		
				7000	280	27,44	19,63	32,83	38,50	25,58	29,14		0,487	173,5	56,4			27,32	24,71	21,56	23,55	24,3	0,471	165,7	58,3		
				8000	320	31,36	18,26	31,45	37,40	24,38	27,87		0,509	176,3	61,6			26,20	24,00	20,68	22,80	23,4	0,489	207,9	64,1		
				9000	360	35,28	17,11	30,43	36,47	23,24	26,81		0,528	209,9	66,9			25,28	23,17	19,79	21,89	22,5	0,509	202,5	69,3		
				10000	400	39,2	16,45	29,53	35,72	22,86	26,14		0,540	330,9	72,7			24,69	22,57	19,48	21,71	22,1	0,518	428,6	75,7		
35	0	750	5	0	0	0	58,36	54,92	57,49	60,47	57,81		0			80,9	13,72	53,04	45,60	57,27	63,81	54,9	0			115,9	13,72
				500	20	1,96	56,26	51,12	56,78	61,44	56,40		0,024	80,4	80,4			51,94	45,07	56,62	63,37	54,3	0,012	158,3	158,3		
				1000	40	3,92	54,73	49,86	55,40	60,04	55,01		0,048	81,4	80,9			50,69	43,62	55,59	62,39	53,1	0,034	91,4	115,9		
				1500	60	5,88	53,68	48,78	54,14	58,85	53,86		0,068	99,0	86,1			49,76	42,00	54,63	61,48	52,0	0,054	97,4	109,0		
				2000	80	7,84	52,60	47,70	53,46	57,86	52,91		0,085	118,3	92,4			48,75	41,16	54,05	60,73	51,2	0,068	135,4	114,6		
				2500	100	9,8	51,36	46,49	52,14	56,67	51,67		0,106	91,4	92,2			47,91	40,30	53,08	60,29	50,4	0,083	138,5	118,7		
				3000	120	11,76	50,27	45,26	50,96	55,42	50,48		0,127	95,4	92,7			47,14	39,31	52,11	59,47	49,5	0,099	121,3	119,1		
				3500	140	13,72	48,60	43,65	49,20	53,50	48,74		0,157	65,1	87,4			46,06	37,56	50,36	57,78	47,9	0,127	68,7	107,8		
				4000	160	15,68	29,60	24,73	29,75	33,84	29,48		0,490	5,9	32,0			26,55	17,46	30,32	38,92	28,3	0,485	5,5	32,4		
				4500	180	17,64	28,67	24,05	28,96	32,82	28,63		0,505	132,5	34,9			25,59	16,40	29,30	37,57	27,2	0,505	98,1	35,0		
				5000	200	19,6	27,60	23,21	28,01	32,00	27,71		0,521	123,2	37,6			24,58	15,28	28,12	37,41	26,3	0,520	124,1	37,7		
				6000	240	23,52	26,54	21,70	26,67	30,72	26,41		0,543	174,7	43,3			23,27	13,60	26,44	35,00	24,6	0,553	121,7	42,6		
				7000	280	27,44	25,35	20,74	25,35	29,56	25,25		0,563	195,8	48,7			22,32	12,00	25,17	34,15	23,4	0,574	184,4	47,8		
				8000	320	31,36	24,13	19,32	24,39	28,71	24,14		0,582	203,7	53,8			21,41	11,37	24,35	33,56	22,7	0,587	292,0	53,4		
				9000	360	35,28	23,33	18,88	23,59	27,57	23,34		0,596	285,1	59,2			20,61	9,93	23,29	32,73	21,6	0,606	208,5	58,2		
				10000	400	39,2	22,94	18,40	22,80	23,46	21,90		0,621	157,1	63,1			19,97	9,49	22,58	32,61	21,2	0,615	450,9	63,8		

Продовження табл. Б.4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
36	0,5	250	5	0	0	0	60,66	57,04	57,17	60,29	58,79		0			27,9	1,96	67,00	55,35	51,54	62,72	59,2	0			31,6	1,96
				500	20	1,96	56,19	52,77	52,67	55,13	54,19		0,078	25,0	25,0			62,56	50,24	47,15	49,33	52,3	0,116	17,0	17,0		
				1000	40	3,92	52,60	49,40	49,00	51,10	50,53		0,141	31,4	27,9			59,76	47,31	44,72	55,46	51,8	0,124	228,5	31,6		
				1500	60	5,88	50,12	46,69	46,30	49,24	48,09		0,182	47,3	32,3			58,17	45,27	46,65	53,56	50,9	0,139	128,8	42,2		
				2000	80	7,84	48,35	44,86	43,95	46,85	46,00		0,218	55,3	36,0			56,39	43,53	41,18	52,25	48,3	0,183	45,0	42,9		
				2500	100	9,8	46,53	42,82	41,70	45,00	44,01		0,251	57,9	39,0			55,16	42,00	39,57	51,37	47,0	0,205	88,3	47,8		
				3000	120	11,76	45,20	41,63	40,50	43,00	42,58		0,276	80,6	42,7			53,78	40,55	37,74	48,91	45,2	0,235	65,1	50,0		
				3500	140	13,72	43,68	40,18	38,60	41,39	40,96		0,303	71,1	45,2			52,29	38,83	35,97	47,80	43,7	0,261	76,2	52,6		
				4000	160	15,68	42,20	38,30	37,50	40,05	39,51		0,328	79,5	47,8			42,59	28,66	26,00	38,56	34,0	0,426	11,9	36,8		
				4500	180	17,64	40,80	37,17	36,17	38,53	38,17		0,351	85,7	50,3			41,08	27,02	24,56	36,20	32,2	0,455	66,7	38,7		
				5000	200	19,6	39,00	35,25	34,14	36,11	36,13		0,386	56,4	50,8			38,92	24,46	22,24	34,36	30,0	0,493	52,2	39,8		
				6000	240	23,52	35,00	31,30	29,80	31,70	31,95		0,457	55,2	51,5			35,22	21,15	18,72	30,30	26,3	0,555	63,6	42,4		
				7000	280	27,44	32,80	29,25	27,80	30,57	30,11		0,488	124,9	56,2			32,68	18,75	16,44	28,61	24,1	0,592	104,1	46,3		
				8000	320	31,36	31,30	28,28	26,36	29,10	28,76		0,511	171,3	61,4			31,63	17,00	14,94	29,87	23,4	0,605	305,1	51,8		
				9000	360	35,28	30,35	27,10	25,40	27,68	27,63		0,530	204,4	66,6			30,60	15,88	13,82	26,28	21,6	0,634	135,2	55,6		
				10000	400	39,2	29,64	26,62	24,91	27,71	27,22		0,537	558,7	73,0			29,84	15,05	13,20	25,75	21,0	0,646	338,5	60,7		
37	0,5	500	5	0	0	0	65,78	63,63	59,38	61,44	62,56		0			44,4	7,84	47,30	42,02	39,97	44,73	43,5	0			39,0	27,4
				500	20	1,96	62,29	60,09	55,79	57,80	58,99		0,057	34,4	34,4			47,75	37,35	33,50	43,34	40,5	0,069	28,2	28,2		
				1000	40	3,92	60,37	58,27	53,76	55,75	57,04		0,088	62,7	44,4			46,28	36,10	32,58	41,56	39,1	0,101	62,9	39,0		
				1500	60	5,88	58,96	56,79	52,10	53,87	55,43		0,114	76,3	51,6			44,97	34,64	30,79	40,46	37,7	0,133	60,3	44,2		
				2000	80	7,84	57,50	55,48	50,76	52,41	54,04		0,136	88,1	57,6			44,18	33,78	30,14	39,77	37,0	0,150	114,1	52,2		
				2500	100	9,8	55,90	53,86	48,90	50,68	52,34		0,163	72,0	60,0			43,57	32,94	29,53	39,17	36,3	0,166	128,2	59,2		
				3000	120	11,76	43,00	39,50	30,80	31,40	36,18		0,422	7,6	27,9			42,78	32,12	28,71	38,08	35,4	0,186	96,9	63,3		
				3500	140	13,72	37,00	35,44	27,10	28,00	31,89		0,490	28,6	28,0			42,20	31,23	28,16	37,90	34,9	0,198	155,0	69,1		
				4000	160	15,68	34,87	33,77	25,50	25,93	30,02		0,520	65,7	30,1			41,30	30,16	27,51	37,70	34,2	0,215	121,0	73,1		
				4500	180	17,64	33,33	32,17	24,15	24,64	28,57		0,543	84,9	32,5			41,20	28,99	26,43	36,96	33,4	0,232	110,4	75,9		
				5000	200	19,6	32,20	31,23	22,90	23,50	27,46		0,561	110,0	34,9			40,00	27,93	25,13	36,97	32,5	0,253	96,1	77,5		
				6000	240	23,52	30,38	29,28	21,40	21,60	25,67		0,590	136,8	39,9			38,66	26,00	23,85	34,65	30,8	0,292	99,3	80,5		
				7000	280	27,44	29,30	28,20	20,40	20,63	24,63		0,606	237,5	45,3			36,58	23,52	21,89	32,89	28,7	0,340	82,4	80,7		
				8000	320	31,36	28,50	27,59	19,36	19,73	23,80		0,620	292,8	50,6			32,92	20,60	18,57	29,67	25,4	0,415	52,0	75,5		
				9000	360	35,28	27,83	26,95	18,98	19,16	23,23		0,629	434,0	56,1			31,97	19,16	17,44	27,56	24,0	0,448	121,2	78,8		
				10000	400	39,2	27,27	26,43	18,30	18,70	22,68		0,638	441,8	61,5			31,04	18,28	16,29	27,32	23,2	0,466	213,2	84,1		

Продовження табл. Б.4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
38	0,5	750	5	0	0	0	61,70	60,63	64,80	65,30	63,11		0			67,5	7,84	63,00	53,00	58,08	68,43	60,6	0			90,5	13,7
				500	20	1,96	59,33	57,74	62,54	64,17	60,95		0,034	57,2	57,2			62,12	52,12	57,21	66,71	59,5	0,018	109,3	109,3		
				1000	40	3,92	57,85	56,25	61,14	62,53	59,44		0,058	82,3	67,5			60,88	50,82	55,05	65,25	58,0	0,043	77,2	90,5		
				1500	60	5,88	56,26	54,74	59,44	60,87	57,83		0,084	76,6	70,3			60,16	50,05	54,77	63,53	57,1	0,058	136,2	101,9		
				2000	80	7,84	55,23	53,69	58,46	58,60	56,50		0,105	92,8	74,8			58,62	48,80	53,00	63,30	55,9	0,077	99,2	101,2		
				2500	100	9,8	53,90	52,20	57,24	58,60	55,49		0,121	122,5	81,1			58,14	47,67	52,25	61,54	54,9	0,094	115,4	103,7		
				3000	120	11,76	32,00	31,08	35,17	35,67	33,48		0,469	5,6	25,0			56,68	47,08	51,41	60,85	54,0	0,109	132,8	107,7		
				3500	140	13,72	30,30	29,15	33,50	34,30	31,81		0,496	74,2	27,7			54,37	44,82	49,71	58,28	51,8	0,146	53,8	94,2		
				4000	160	15,68	28,30	27,30	31,30	32,70	29,90		0,526	64,7	29,8			34,60	24,04	29,10	37,98	31,4	0,482	5,8	32,6		
				4500	180	17,64	26,70	25,90	30,40	31,40	28,60		0,547	95,1	32,3			31,10	21,53	26,82	36,04	28,9	0,524	46,5	33,7		
				5000	200	19,6	25,40	24,70	29,64	30,47	27,55		0,563	118,1	34,8			29,89	19,87	25,12	34,11	27,2	0,551	73,1	35,6		
				6000	240	23,52	24,30	23,20	28,45	29,30	26,31		0,583	199,5	40,3			28,95	18,00	23,20	31,86	25,5	0,579	136,2	40,6		
				7000	280	27,44	23,40	22,30	27,36	28,34	25,35		0,598	257,0	45,9			27,68	17,03	21,50	31,33	24,4	0,598	212,7	45,9		
				8000	320	31,36	22,43	21,32	26,80	27,11	24,42		0,613	264,6	51,1			27,00	16,17	20,95	30,55	23,7	0,610	331,2	51,4		
				9000	360	35,28	21,80	20,70	25,96	27,35	23,95		0,620	534,9	56,9			25,90	15,21	20,69	30,48	23,1	0,619	397,8	57,0		
				10000	400	39,2	20,85	20,11	25,70	26,50	23,29		0,631	373,4	62,1			25,90	14,94	19,80	30,58	22,8	0,624	896,8	62,8		
39	1	250	5	0	0	0	58,18	54,52	66,30	70,68	62,42		0			23,5	1,96	63,84	52,69	54,85	65,72	59,3	0			26,7	3,92
				500	20	1,96	51,29	47,97	60,21	63,75	55,81		0,106	18,5	18,5			56,58	46,59	52,78	60,85	54,2	0,086	22,9	22,9		
				1000	40	3,92	47,68	44,18	56,61	59,54	52,00		0,167	32,2	23,5			49,60	41,94	52,34	58,47	50,6	0,147	32,2	26,7		
				1500	60	5,88	45,02	41,31	53,40	57,00	49,18		0,212	43,4	27,7			46,15	38,66	50,95	57,78	48,4	0,184	52,7	32,0		
				2000	80	7,84	42,23	38,66	51,07	55,00	46,74		0,251	50,1	31,2			43,00	35,76	49,66	55,92	46,1	0,223	50,5	35,2		
				2500	100	9,8	39,73	36,16	48,88	53,09	44,47		0,288	53,8	34,1			40,55	33,92	47,62	53,62	43,9	0,259	53,8	37,8		
				3000	120	11,76	38,27	34,66	47,06	50,00	42,50		0,319	62,2	36,8			38,34	31,55	45,86	51,78	41,9	0,293	56,8	40,1		
				3500	140	13,72	36,39	32,85	45,05	48,25	40,64		0,349	65,7	39,3			35,82	29,16	43,03	48,96	39,2	0,338	44,0	40,6		
				4000	160	15,68	34,50	30,89	42,83	46,18	38,60		0,382	60,1	41,1			33,21	27,30	40,69	46,69	37,0	0,376	51,2	41,7		
				4500	180	17,64	26,62	23,10	34,16	39,33	30,80		0,507	15,7	34,8			30,79	24,47	38,32	43,95	34,4	0,420	44,9	42,0		
				5000	200	19,6	26,02	22,60	35,33	38,19	30,54		0,511	457,4	38,4			27,61	20,80	35,22	40,52	31,0	0,476	34,7	41,1		
				6000	240	23,52	24,26	20,63	31,31	36,23	28,11		0,550	100,8	42,8			24,63	17,73	32,38	38,36	28,3	0,523	84,1	45,0		
				7000	280	27,44	21,54	19,16	30,61	35,16	26,62		0,574	164,2	47,8			23,37	16,73	31,00	37,26	27,1	0,543	196,1	50,5		
				8000	320	31,36	22,30	18,85	30,06	33,82	26,26		0,579	679,7	54,1			22,22	15,96	30,29	36,61	26,3	0,557	283,4	56,3		
				9000	360	35,28	20,55	17,71	29,51	33,00	25,19		0,596	229,8	59,2			21,31	14,54	29,40	35,26	25,1	0,576	203,4	61,2		
				10000	400	39,2	20,58	17,42	29,38	31,02	24,60		0,606	413,0	64,7			20,52	13,59	28,76	35,36	24,6	0,586	407,6	66,9		

Продовження табл. Б.4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
40	1	500	5	0	0	0	50,73	60,83	67,14	56,64	58,84		0			46,9	1,96	41,33	36,80	46,77	51,79	44,2	0			12,8	1,96
				500	20	1,96	46,87	58,06	63,32	53,10	55,34		0,059	33,0	33,0			39,51	34,87	45,75	49,69	42,5	0,284	6,9	6,9		
				1000	40	3,92	45,50	56,53	62,35	51,28	53,92		0,084	81,1	46,9			38,16	33,27	44,22	48,67	41,1	0,307	84,5	12,8		
				1500	60	5,88	44,12	55,15	60,79	49,43	52,37		0,110	74,8	53,5			37,07	32,00	43,00	47,86	40,0	0,325	105,9	18,1		
				2000	80	7,84	43,00	54,00	60,00	48,50	51,38		0,127	115,6	61,8			36,17	31,59	42,45	46,91	39,3	0,337	165,4	23,2		
				2500	100	9,8	41,35	52,95	58,15	47,15	49,90		0,152	78,2	64,5			35,32	30,50	41,47	46,13	38,4	0,353	125,6	27,8		
				3000	120	11,76	40,00	50,80	56,90	45,14	48,21		0,181	68,2	65,1			34,29	29,39	40,70	45,66	37,5	0,367	137,5	32,0		
				3500	140	13,72	26,16	37,16	43,24	31,37	34,48		0,414	8,4	33,1			33,97	28,10	39,92	44,61	36,7	0,382	135,1	35,9		
				4000	160	15,68	22,83	34,72	40,97	29,06	31,90		0,458	44,6	34,2			33,09	27,69	38,64	43,67	35,8	0,396	132,4	39,5		
				4500	180	17,64	20,65	32,80	38,57	26,90	29,73		0,495	53,3	35,7			31,71	26,23	36,77	41,95	34,2	0,424	72,3	41,6		
				5000	200	19,6	19,00	30,80	37,00	25,17	27,99		0,524	66,4	37,4			29,61	23,76	34,45	39,41	31,8	0,463	49,3	42,3		
				6000	240	23,52	16,67	28,58	35,21	23,50	25,99		0,558	115,2	42,1			25,05	19,59	30,13	35,08	27,5	0,537	53,5	43,8		
				7000	280	27,44	15,20	27,25	33,60	22,43	24,62		0,582	168,3	47,2			22,80	16,70	28,00	33,24	25,2	0,575	102,0	47,7		
				8000	320	31,36	14,10	25,87	32,60	21,44	23,50		0,601	206,4	52,2			21,33	15,13	27,00	32,27	23,9	0,596	185,5	52,6		
				9000	360	35,28	13,65	25,37	31,96	20,72	22,93		0,610	399,4	57,8			21,11	15,05	26,00	31,06	23,3	0,607	370,3	58,1		
				10000	400	39,2	12,74	24,80	31,89	20,52	22,49		0,618	527,2	63,5			20,32	14,37	25,35	31,18	22,8	0,615	464,7	63,7		
41	1	750	5	0	0	0	65,60	72,56	71,50	64,43	68,52		0			55,9	5,88	72,49	66,38	59,65	66,50	66,3	0			69,6	9,80
				500	20	1,96	63,00	70,10	69,00	61,65	65,94		0,038	52,0	52,0			70,44	63,74	58,34	64,81	64,3	0,029	67,5	67,5		
				1000	40	3,92	60,50	67,82	67,00	59,55	63,72		0,070	60,5	55,9			68,82	61,92	56,43	62,92	62,5	0,056	71,7	69,6		
				1500	60	5,88	59,37	66,00	65,27	57,50	62,04		0,095	79,8	62,1			67,22	61,36	55,65	61,56	61,4	0,073	120,8	81,0		
				2000	80	7,84	57,20	64,50	64,14	55,27	60,28		0,120	76,4	65,2			66,23	59,50	54,43	60,19	60,1	0,093	95,5	84,2		
				2500	100	9,8	24,29	31,69	29,49	22,52	27,00		0,606	4,0	16,2			64,67	58,00	52,58	58,17	58,4	0,119	75,0	82,2		
				3000	120	11,76	23,80	31,40	29,45	22,03	26,67		0,611	410,1	19,3			37,85	28,51	29,89	38,55	33,7	0,491	5,3	23,9		
				3500	140	13,72	22,78	30,00	28,44	20,83	25,51		0,628	116,0	21,9			35,25	25,70	27,50	35,87	31,1	0,531	49,6	25,8		
				4000	160	15,68	22,00	29,15	27,85	20,26	24,82		0,638	192,6	24,6			24,80	18,23	28,82	35,33	26,8	0,596	30,3	26,3		
				4500	180	17,64	21,53	29,12	27,22	19,30	24,29		0,645	257,0	27,3			24,57	17,45	28,32	34,35	26,2	0,605	208,6	29,2		
				5000	200	19,6	20,73	28,53	26,67	18,74	23,67		0,655	214,9	29,9			23,64	16,33	27,34	33,62	25,2	0,619	138,1	31,7		
				6000	240	23,52	20,45	27,76	25,72	17,73	22,92		0,666	357,0	35,3			22,32	16,14	26,09	32,56	24,3	0,634	272,0	37,1		
				7000	280	27,44	19,30	27,50	25,00	17,15	22,24		0,675	396,5	40,6			21,14	14,57	25,24	31,49	23,1	0,651	222,5	42,1		
				8000	320	31,36	19,04	26,60	24,34	16,50	21,62		0,684	435,0	45,8			20,76	13,78	24,61	30,90	22,5	0,660	434,7	47,5		
				9000	360	35,28	18,39	26,11	23,34	15,85	20,92		0,695	385,1	50,8			20,42	13,55	24,19	30,53	22,2	0,665	763,9	53,0		
				10000	400	39,2	18,36	26,04	23,28	15,25	20,73		0,697	1413,7	56,2			19,87	13,15	23,79	30,38	21,8	0,671	692,6	58,4		

Продовження табл. Б.4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
42	0	1000	5	0	0	0	65,78	62,87	62,89	65,70	64,31		0			57,69	10,58										
				500	20	1,96	65,23	61,26	55,28	57,74	59,88		0,069	28,4	28,4												
				1000	40	3,92	61,88	59,29	53,75	55,84	57,69		0,103	57,6	38,1												
				1500	60	5,88	60,60	57,91	51,61	54,34	56,12		0,127	80,0	46,1												
				2000	80	7,84	59,34	56,58	50,57	53,20	54,92		0,146	105,7	53,7												
				2500	100	9,8	57,80	54,69	48,74	51,46	53,17		0,173	100,8	61,1												
				3000	120	11,76	33,43	30,13	25,13	27,63	29,08		0,548	3,1	21,5												
				3500	140	13,72	32,47	27,46	22,12	26,54	27,15		0,578	65,2	23,7												
				4000	160	15,68	31,00	28,07	22,51	25,96	26,89		0,582	480,2	26,9												
				4500	180	17,64	30,56	27,10	21,10	25,12	25,97		0,596	137,8	29,6												
				5000	200	19,6	30,25	26,29	19,86	24,66	25,27		0,607	178,8	32,3												
				6000	240	23,52	28,93	25,20	19,50	23,56	24,30		0,622	260,6	37,8												
				7000	280	27,44	27,36	24,21	19,20	22,90	23,42		0,636	286,5	43,2												
				8000	320	31,36	27,20	23,05	18,30	21,74	22,57		0,649	298,3	48,3												
				9000	360	35,28	26,08	22,21	17,69	21,22	21,80		0,661	326,3	53,4												
				10000	400	39,2	25,87	21,80	17,16	21,16	21,50		0,666	833,4	58,9												
43	0,5	1000	5	0	0	0	60,55	50,16	53,73	63,78	57,06		0			48,4	9,8										
				500	20	1,96	57,22	46,55	50,85	60,26	53,72		0,058	33,5	33,5												
				1000	40	3,92	57,16	44,93	48,96	58,67	52,43		0,081	86,7	48,4												
				1500	60	5,88	54,30	43,82	48,34	58,00	51,12		0,104	85,0	56,5												
				2000	80	7,84	53,62	43,06	47,35	56,93	50,24		0,119	127,8	65,6												
				2500	100	9,8	52,60	41,47	46,24	55,51	48,96		0,142	87,0	69,0												
				3000	120	11,76	28,10	23,45	37,28	42,22	32,76		0,426	5,5	26,7												
				3500	140	13,72	25,60	20,93	35,08	39,88	30,37		0,468	56,1	29,3												
				4000	160	15,68	23,30	19,09	33,03	37,74	28,29		0,504	53,7	31,1												
				4500	180	17,64	23,05	18,17	32,48	37,13	27,71		0,514	192,0	34,3												
				5000	200	19,6	22,12	17,41	31,78	36,55	26,97		0,527	150,6	37,2												
				6000	240	23,52	21,19	16,56	30,79	35,08	25,91		0,546	211,0	43,1												
				7000	280	27,44	19,87	15,86	30,22	34,39	25,09		0,560	272,8	49,0												
				8000	320	31,36	18,99	15,36	29,35	33,33	24,26		0,575	270,3	54,6												
				9000	360	35,28	18,46	14,57	28,88	32,55	23,62		0,586	348,1	60,2												
				10000	400	39,2	17,46	13,77	28,17	32,46	22,97		0,597	344,1	65,6												

Кінець табл. Б.4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
44	1	1000	5	0	0	0	64,73	67,88	73,84	71,38	69,46		0			63,30	9,8										
				500	20	1,96	61,54	59,30	70,44	72,09	65,84		0,052	37,7	37,7												
				1000	40	3,92	58,39	57,10	67,97	69,75	63,30		0,089	53,6	44,2												
				1500	60	5,88	56,76	55,66	66,79	68,55	61,94		0,108	99,9	54,3												
				2000	80	7,84	55,91	54,64	65,62	67,23	60,85		0,124	124,9	63,3												
				2500	100	9,8	54,70	53,33	64,38	66,11	59,63		0,141	111,6	69,3												
				3000	120	11,76	52,70	44,20	44,23	40,77	45,48		0,345	9,6	34,1												
				3500	140	13,72	18,73	12,46	29,33	34,68	23,80		0,657	6,3	20,9												
				4000	160	15,68	17,76	12,22	27,76	33,88	22,91		0,670	152,1	23,4												
				4500	180	17,64	16,45	11,85	27,10	33,13	22,13		0,681	176,2	25,9												
				5000	200	19,6	16,40	10,54	26,78	32,57	21,57		0,689	243,1	28,4												
				6000	240	23,52	15,79	9,59	25,84	31,70	20,73		0,702	323,2	33,5												
				7000	280	27,44	14,71	9,79	25,34	32,32	20,54		0,704	1433	39,0												
				8000	320	31,36	13,67	9,35	25,21	30,58	19,70		0,716	325,1	43,8												
				9000	360	35,28	13,90	8,20	24,36	30,05	19,13		0,725	473,5	48,7												
				10000	400	39,2	13,29	8,30	24,86	29,88	19,08		0,725	6050	54,0												

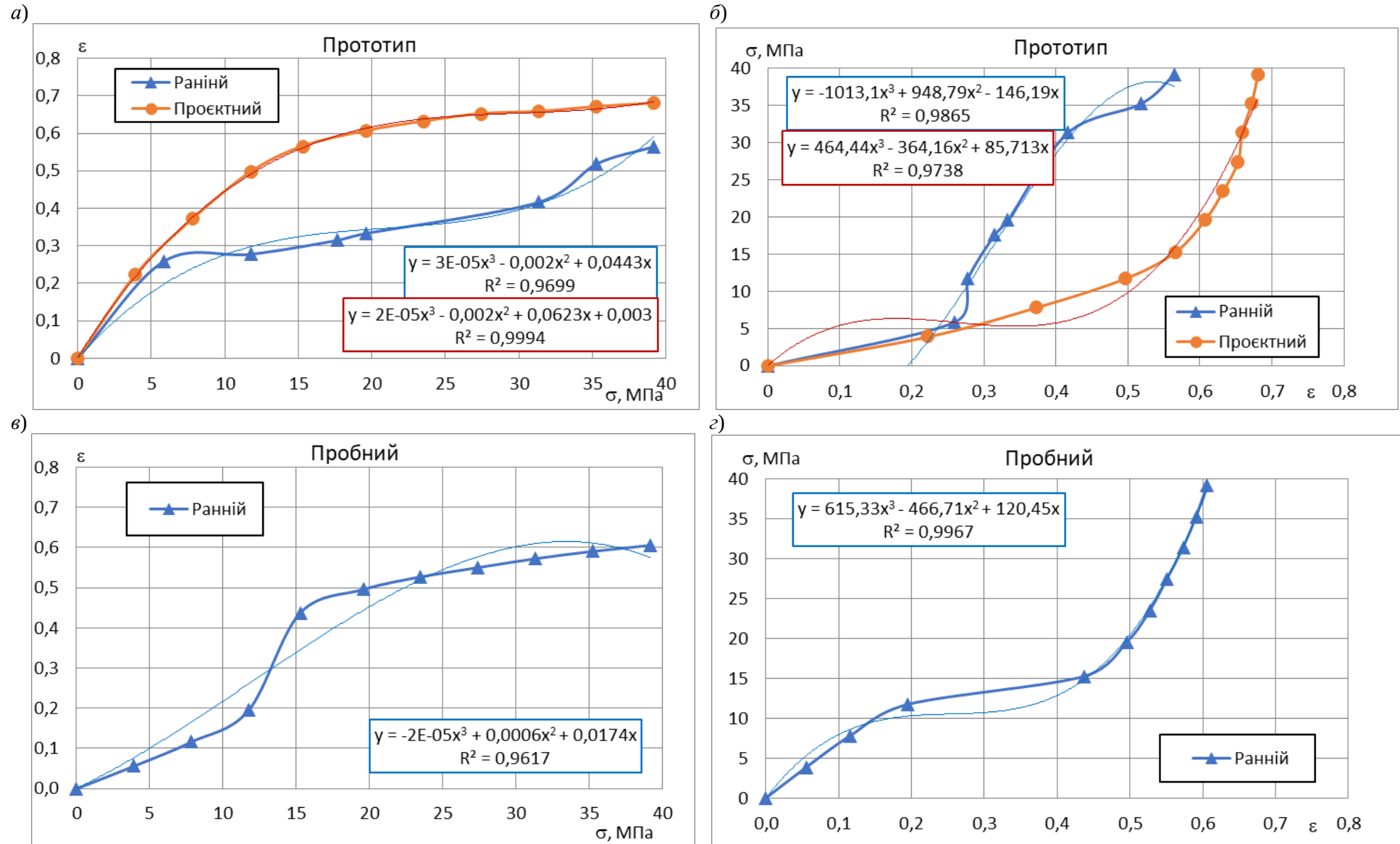


Рисунок Б.2 – Криві деформування зразків прототипу (а, б) і пробного (в, г) у форматі $\varepsilon = f(\sigma)$ (а, в) і $\sigma = f(\varepsilon)$ (б, г) у ранньому і проектному віці

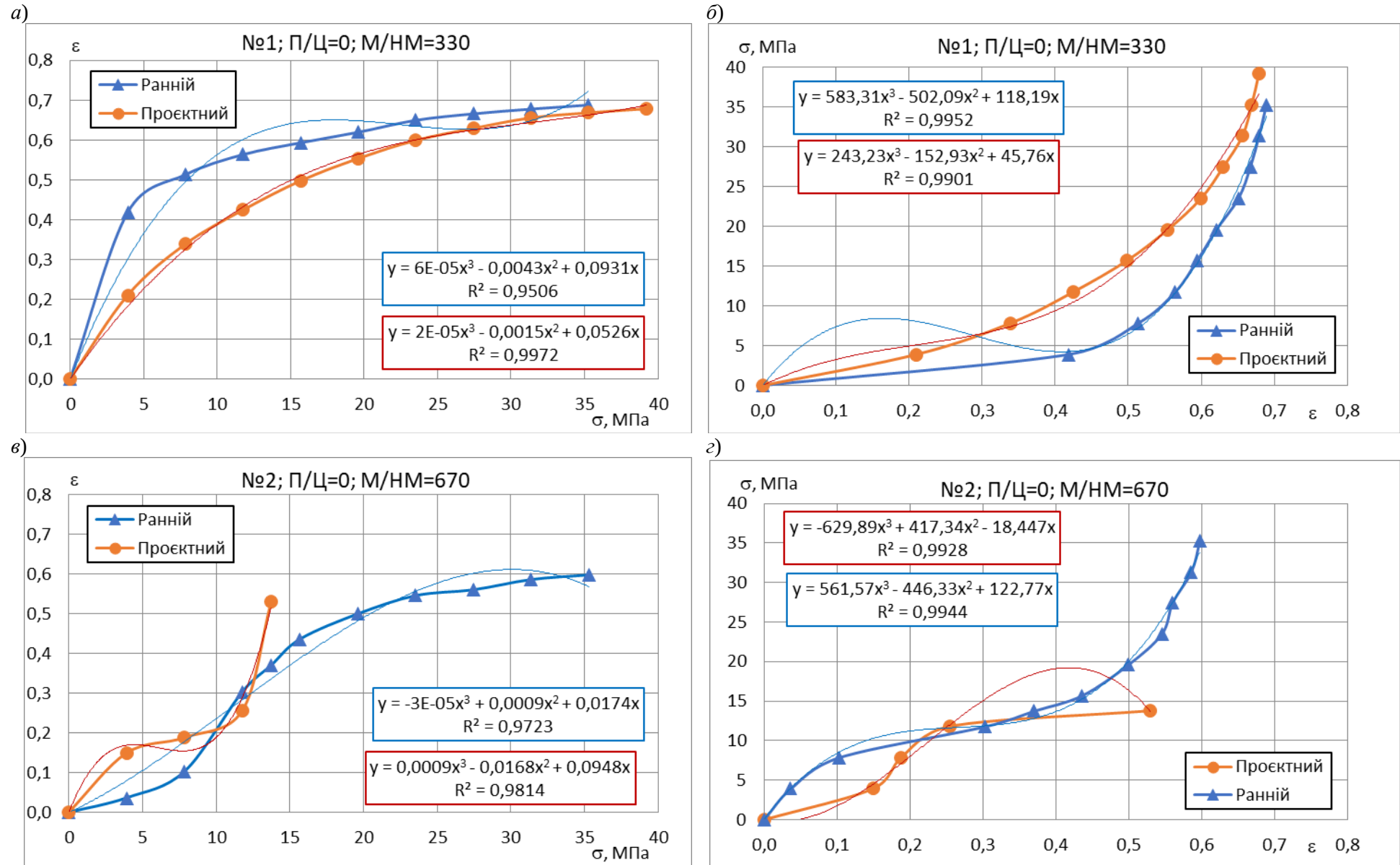


Рисунок Б.3 – Криві деформування зразків №1 (а, б) і №2 (в, г) у форматі $\varepsilon = f(\sigma)$ (а, в) і $\sigma = f(\varepsilon)$ (б, г) у ранньому і проектному віці

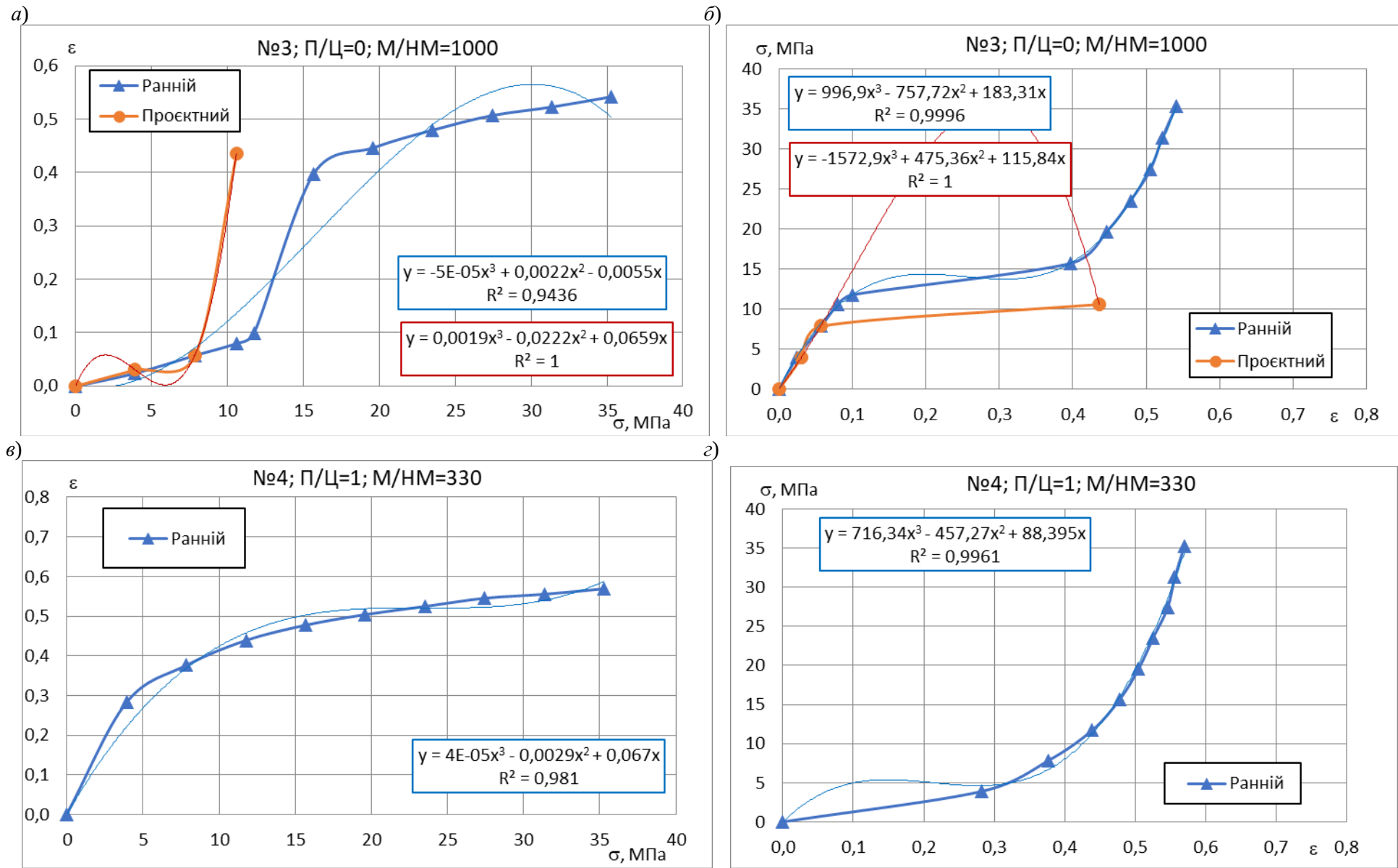


Рисунок Б.4 – Криві деформування зразків №3 (а, б) і №4 (в, г) у форматі $\varepsilon = f(\sigma)$ (а, в) і $\sigma = f(\varepsilon)$ (б, г) у ранньому і проектному віці

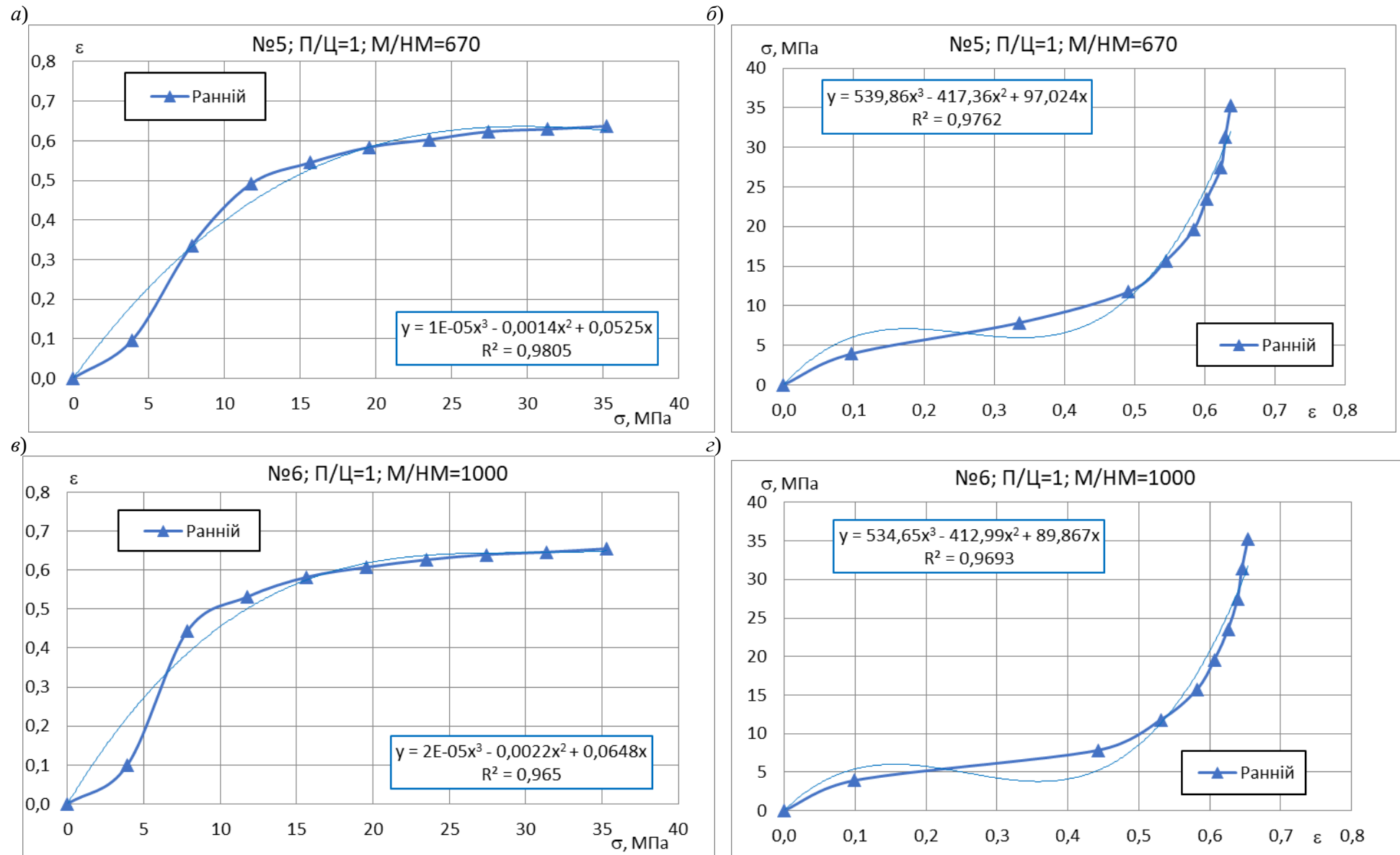


Рисунок Б.5 – Криві деформування зразків №5 (а, б) і №6 (в, г) у форматі $\varepsilon = f(\sigma)$ (а, в) і $\sigma = f(\varepsilon)$ (б, г) у ранньому і проектному віці

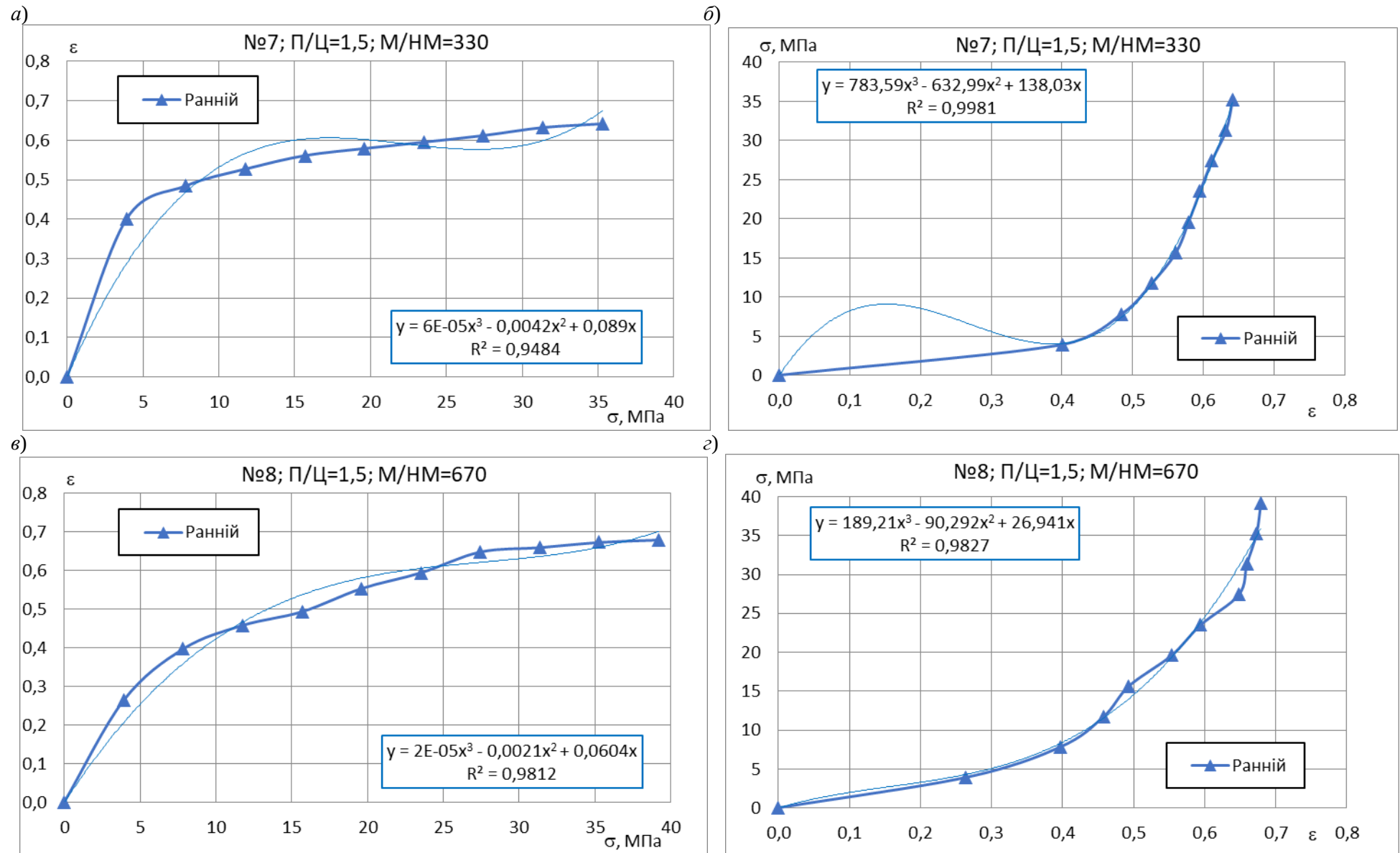


Рисунок Б.6 – Криві деформування зразків №7 (а, б) і №8 (в, г) у форматі $\varepsilon = f(\sigma)$ (а, в) і $\sigma = f(\varepsilon)$ (б, г) у ранньому і проектному віці

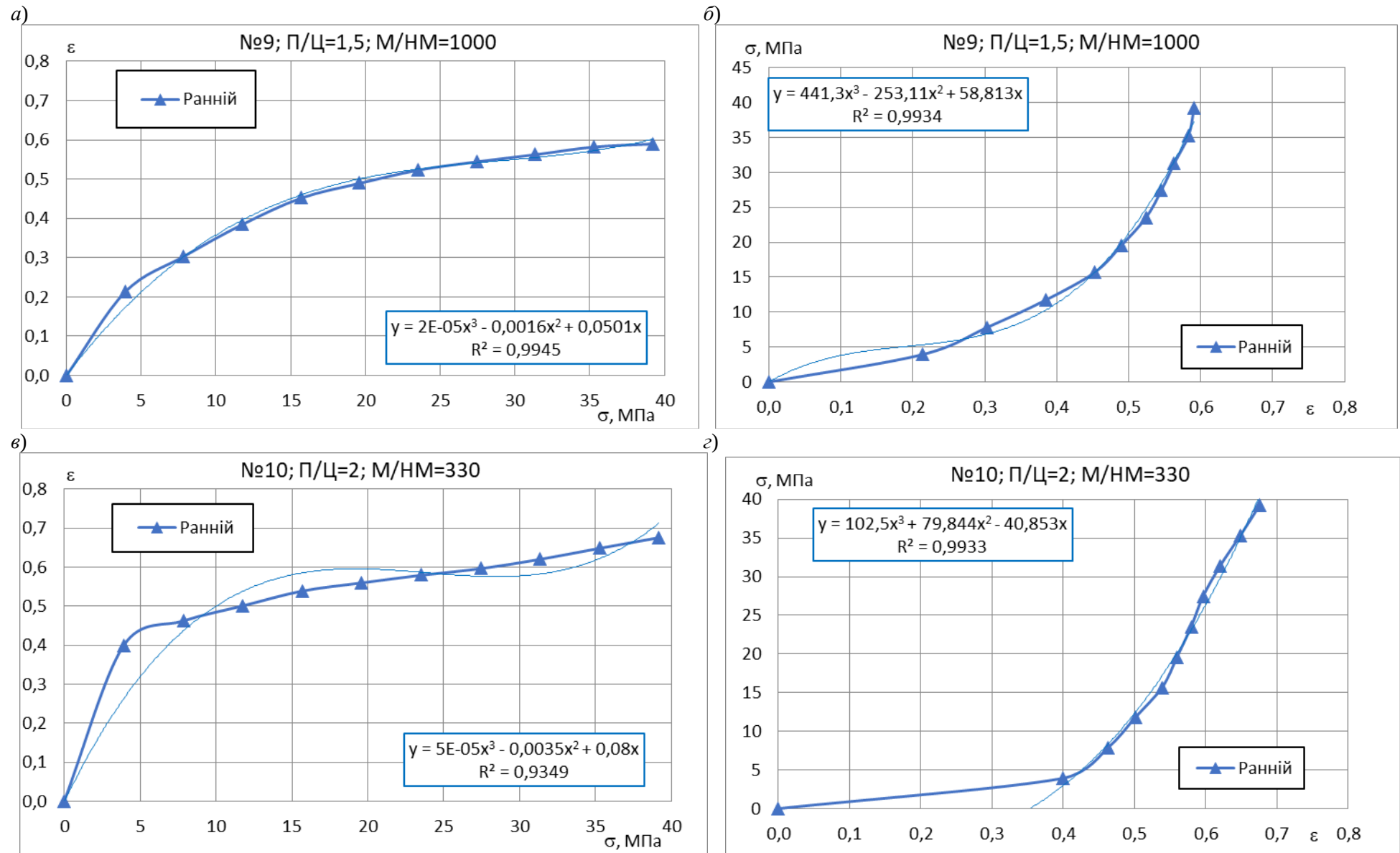


Рисунок Б.7 – Криві деформування зразків №9 (а, б) і №10 (в, з) у форматі $\epsilon = f(\sigma)$ (а, в) і $\sigma = f(\epsilon)$ (б, з) у ранньому і проєктному віці

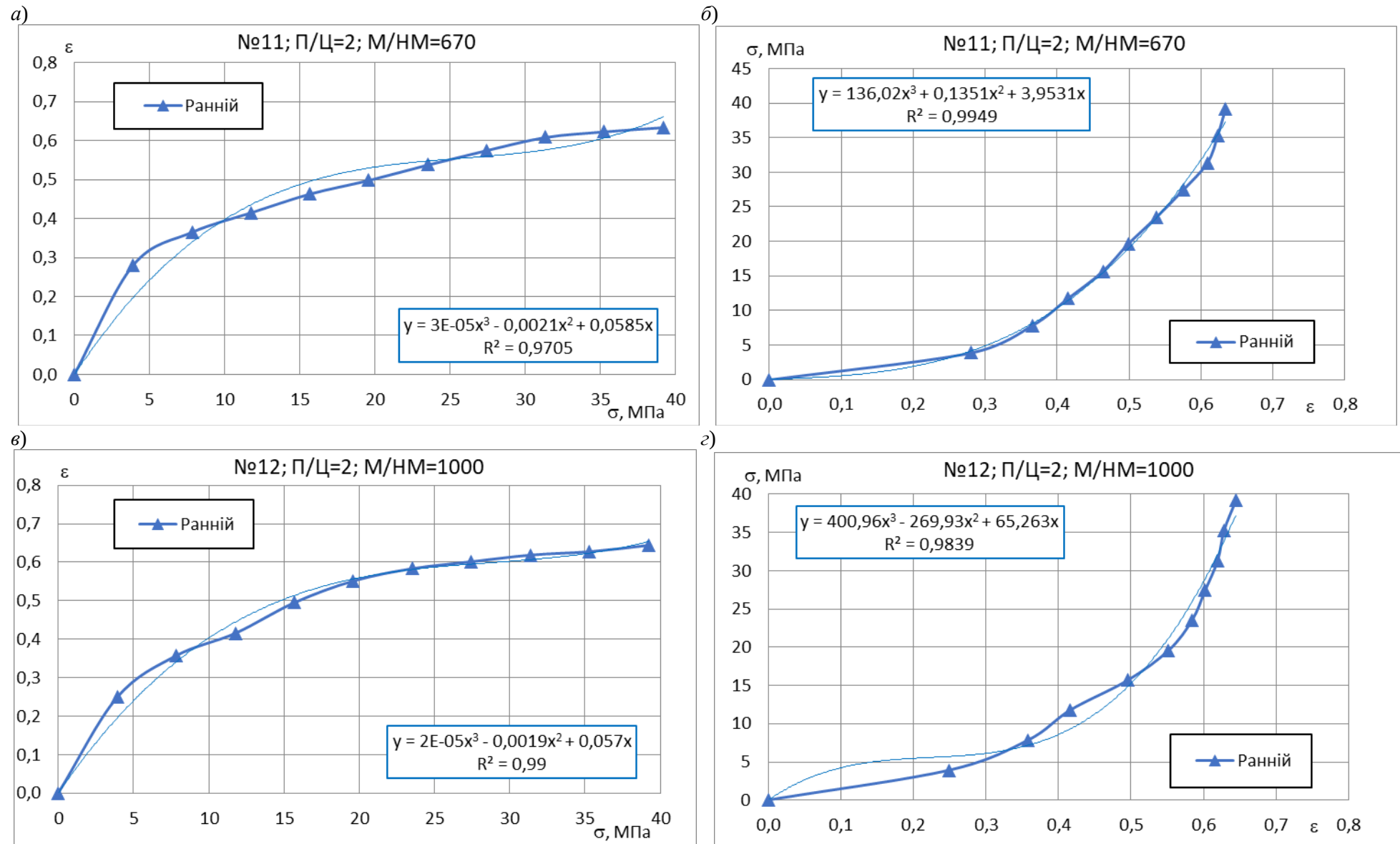


Рисунок Б.8 – Криві деформування зразків №11 (а, б) і №12 (в, г) у форматі $\varepsilon = f(\sigma)$ (а, в) і $\sigma = f(\varepsilon)$ (б, г) у ранньому і проєктному віці

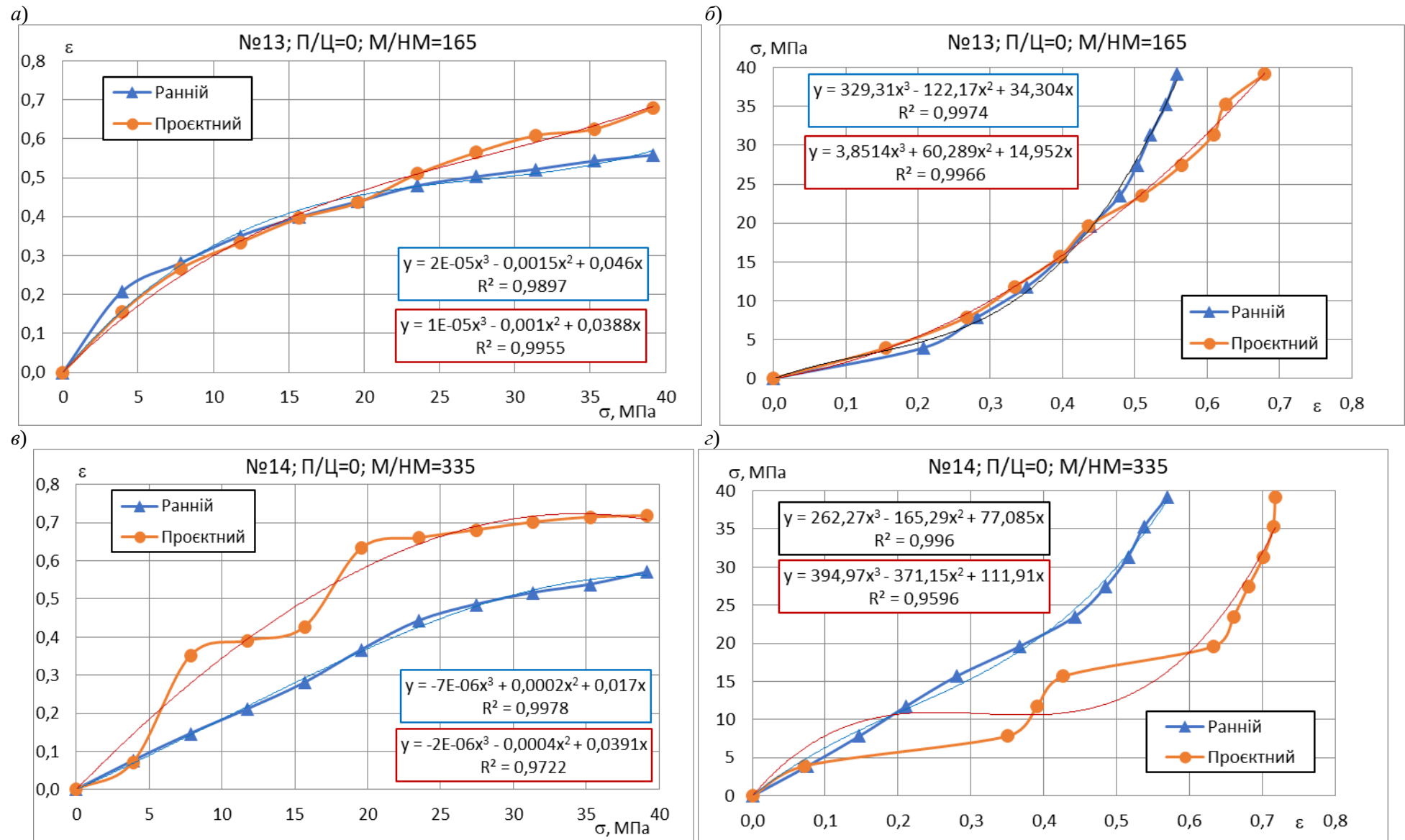


Рисунок Б.9 – Криві деформування зразків №13 (а, б) і №14 (в, з) у форматі $\varepsilon = f(\sigma)$ (а, в) і $\sigma = f(\varepsilon)$ (б, з) у ранньому і проектному віці

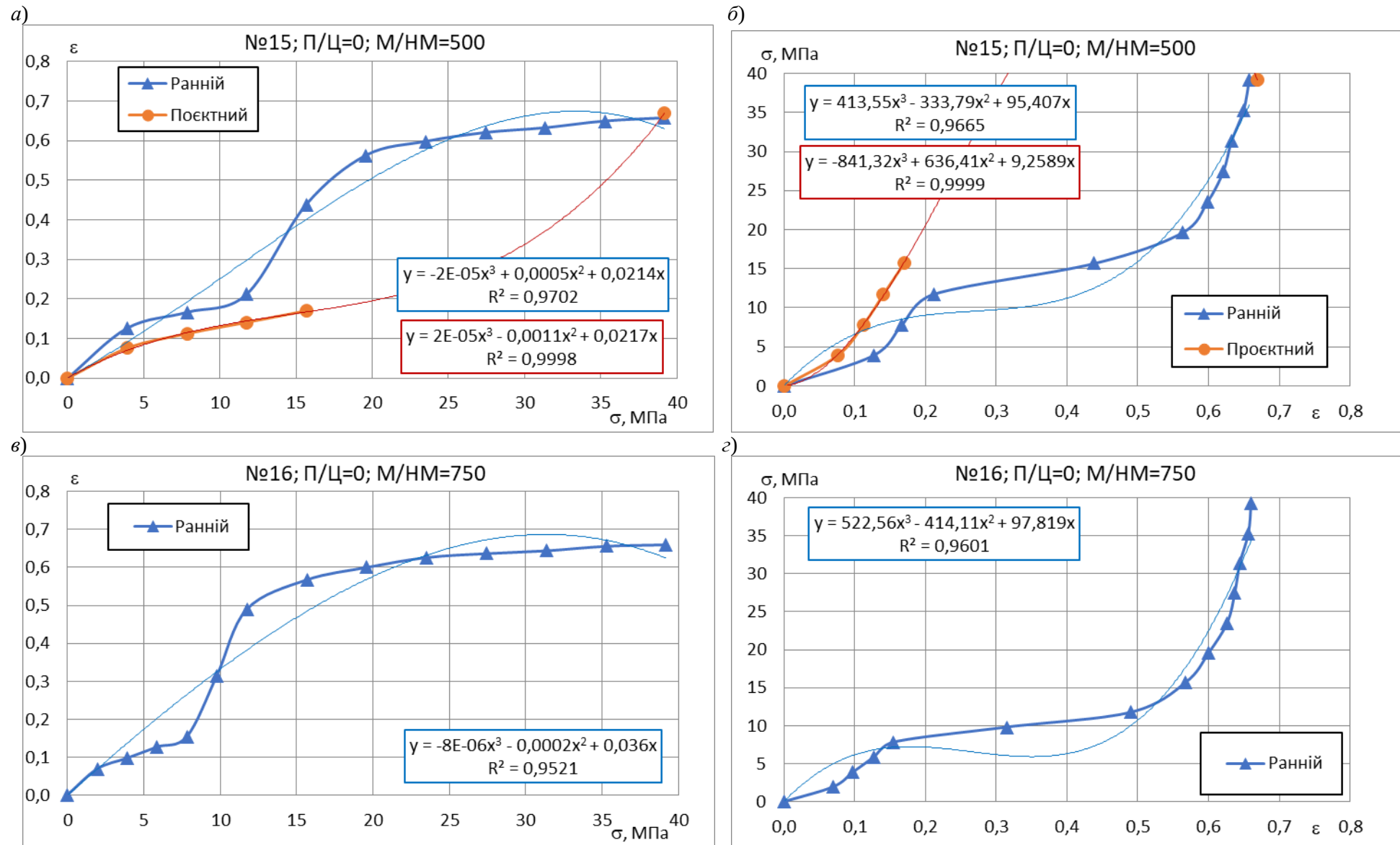


Рисунок Б.10 – Криві деформування зразків №15 (а, б) і №16 (в, г) у форматі $\varepsilon = f(\sigma)$ (а, в) і $\sigma = f(\varepsilon)$ (б, г) у ранньому і проектному віці

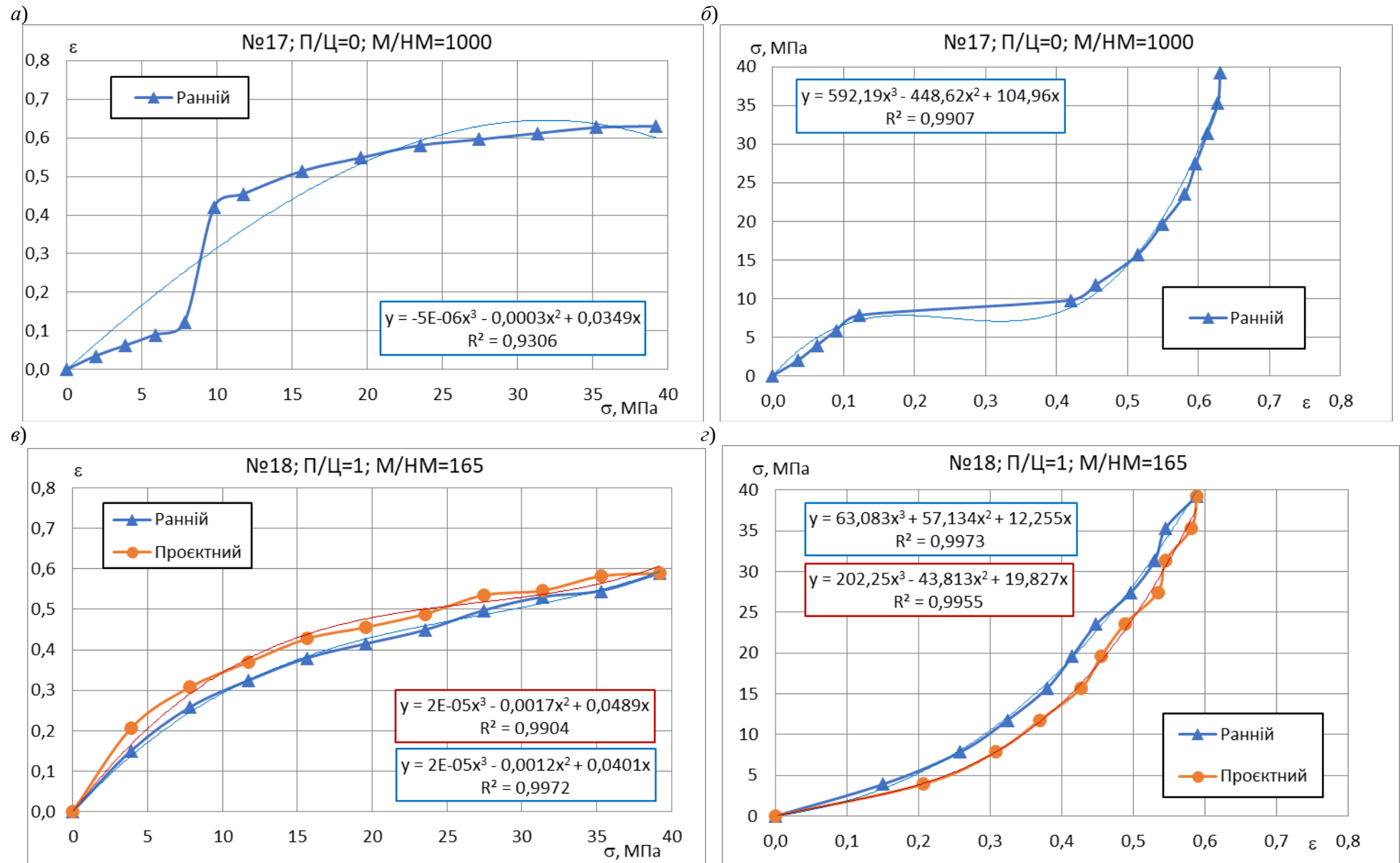


Рисунок Б.11 – Криві деформування зразків №17 (а, б) і №18 (в, г) у форматі $\varepsilon = f(\sigma)$ (а, в) і $\sigma = f(\varepsilon)$ (б, г) у ранньому і проектному віці

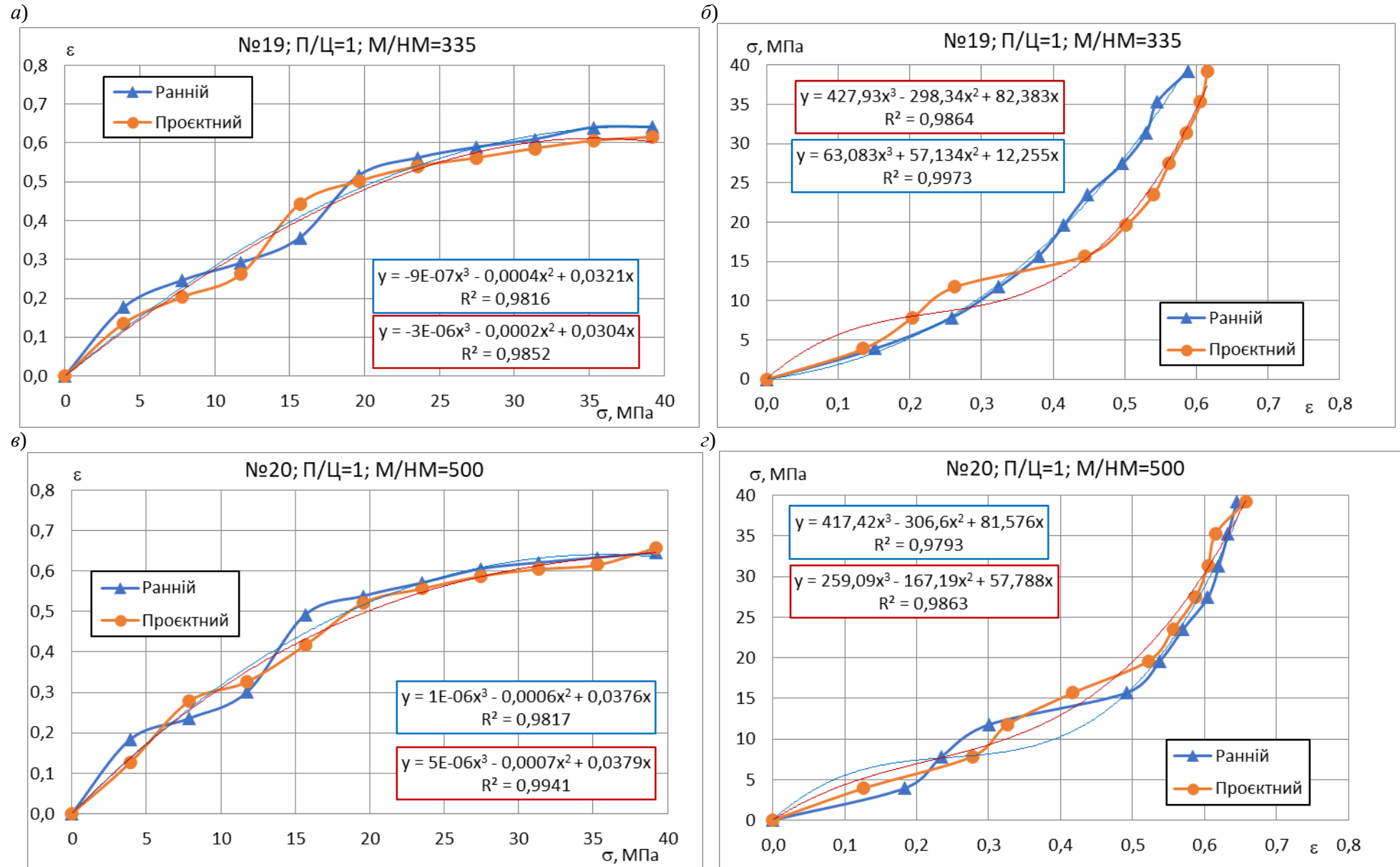


Рисунок Б.12 – Криві деформування зразків №19 (а, б) і №20 (в, г) у форматі $\varepsilon = f(\sigma)$ (а, в) і $\sigma = f(\varepsilon)$ (б, г) у ранньому і проектному віці

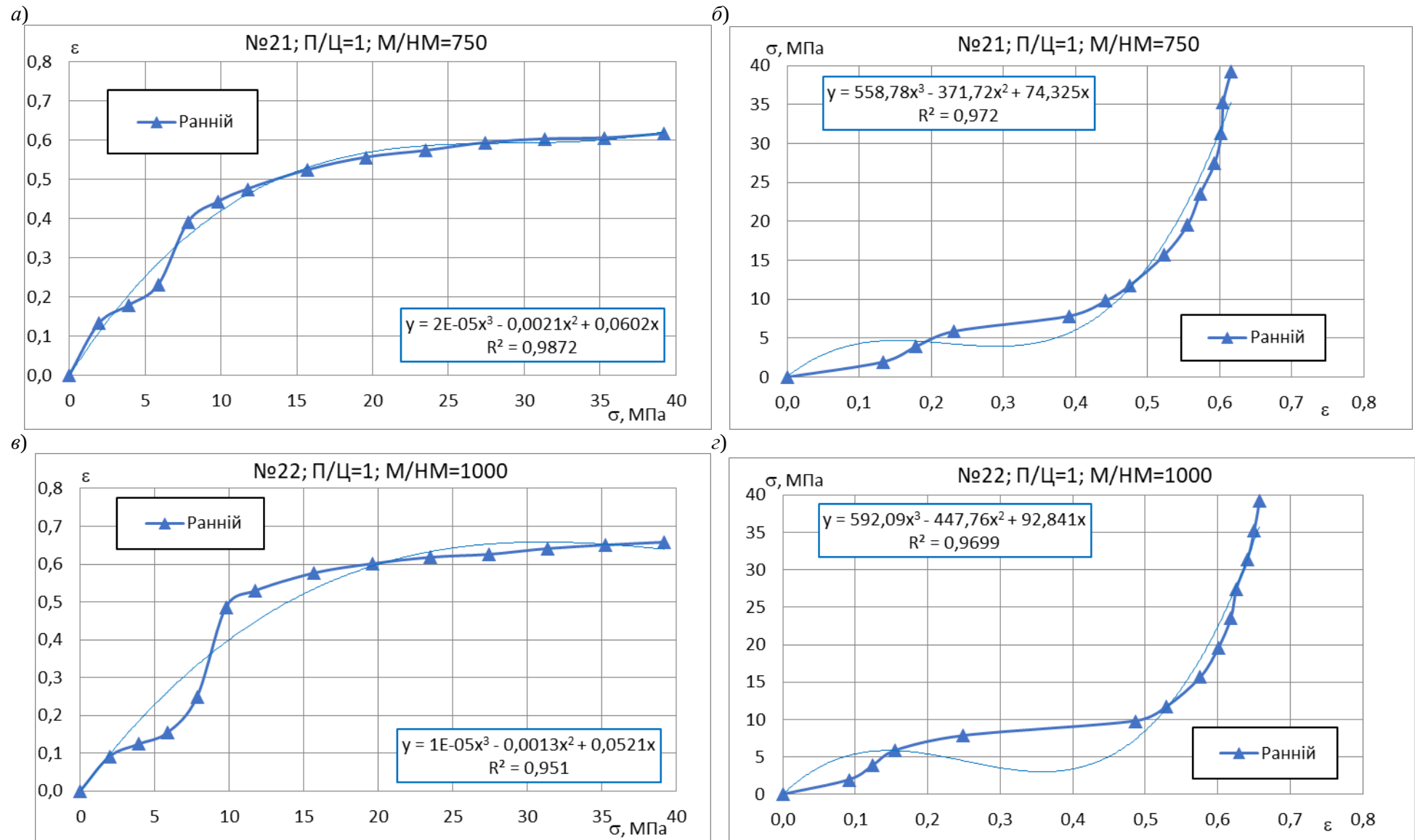


Рисунок Б.13 – Криві деформування зразків №21 (а, б) і №22 (в, г) у форматі $\epsilon = f(\sigma)$ (а, в) і $\sigma = f(\epsilon)$ (б, г) у ранньому і проектному віці

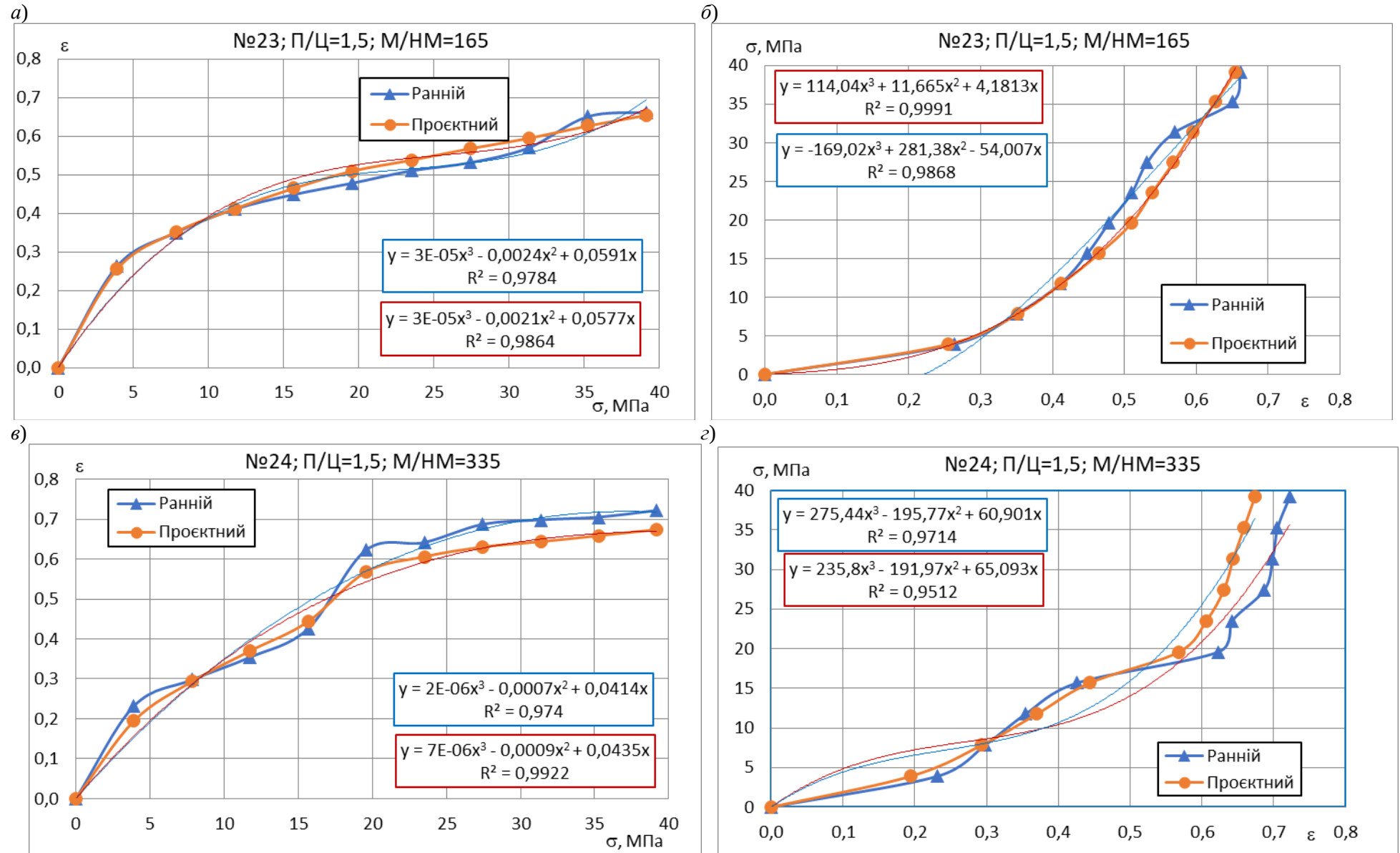


Рисунок Б.14 – Криві деформування зразків №23 (а, б) і №24 (в, г) у форматі $\epsilon = f(\sigma)$ (а, в) і $\sigma = f(\epsilon)$ (б, г) у ранньому і проектному віці

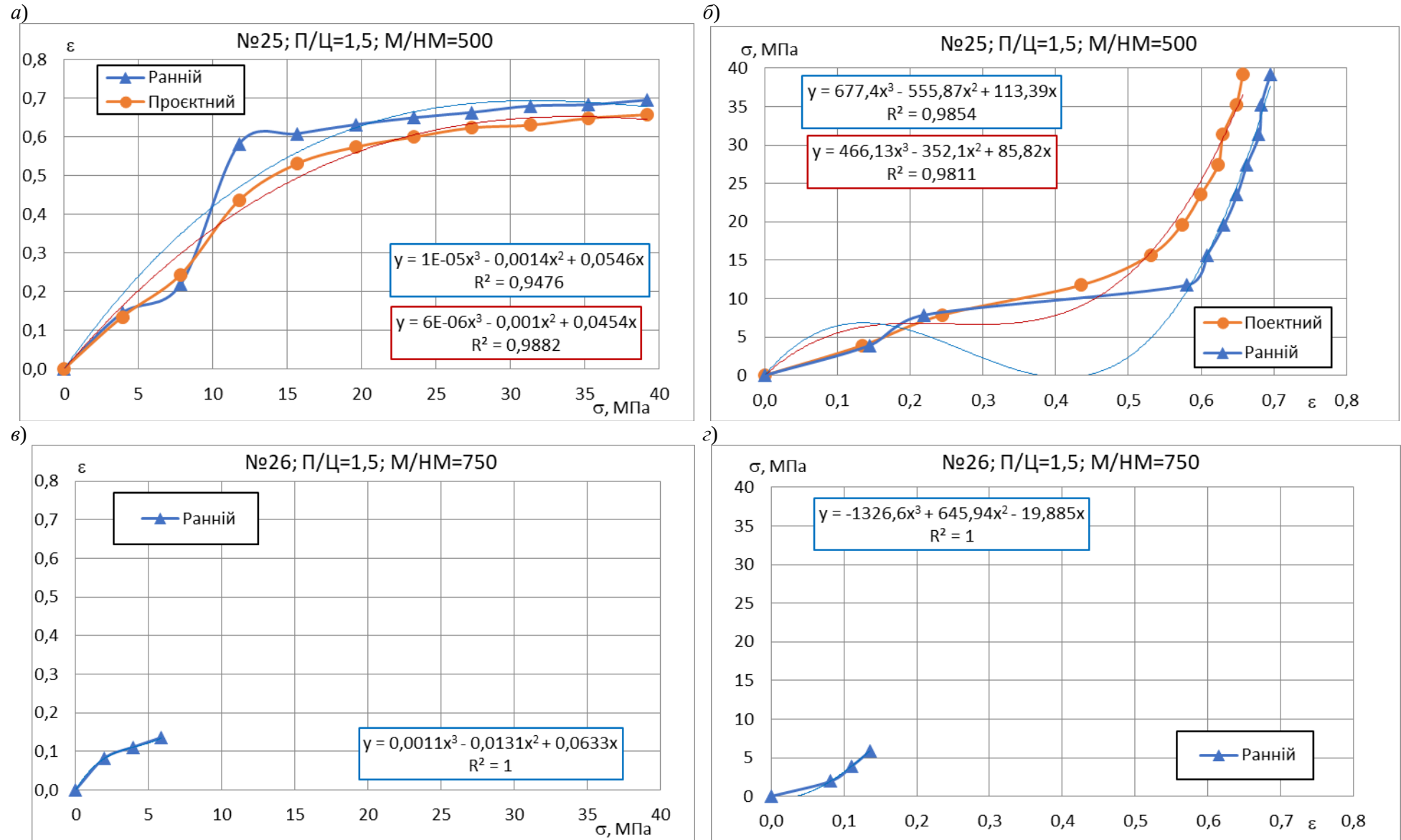


Рисунок Б.15 – Криві деформування зразків №25 (а, б) і №26 (в, г) у форматі $\varepsilon = f(\sigma)$ (а, в) і $\sigma = f(\varepsilon)$ (б, г) у ранньому і проектному віці

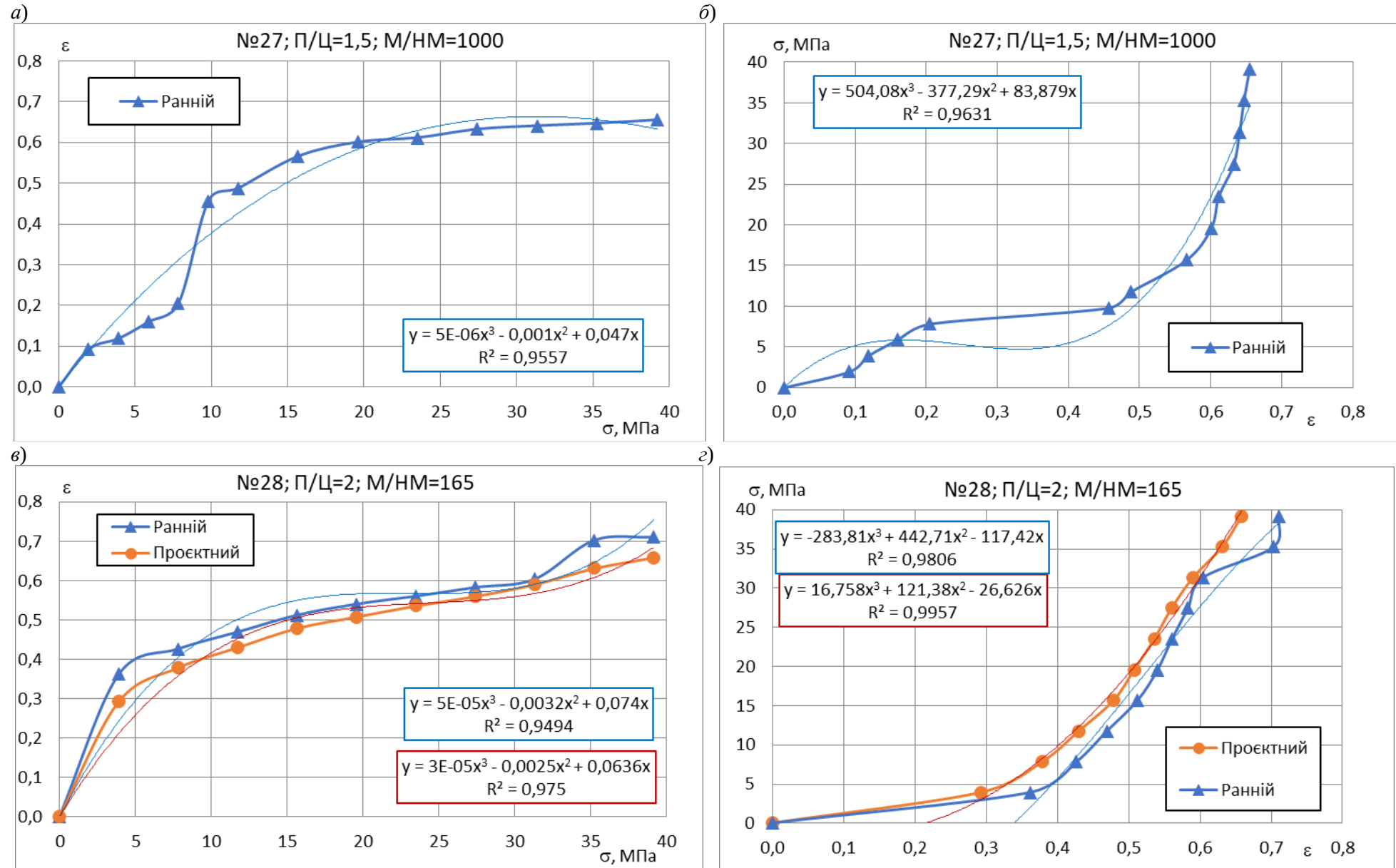


Рисунок Б.16 – Криві деформування зразків №27 (а, б) і №28 (в, г) у форматі $\varepsilon = f(\sigma)$ (а, в) і $\sigma = f(\varepsilon)$ (б, г) у ранньому і проектному віці

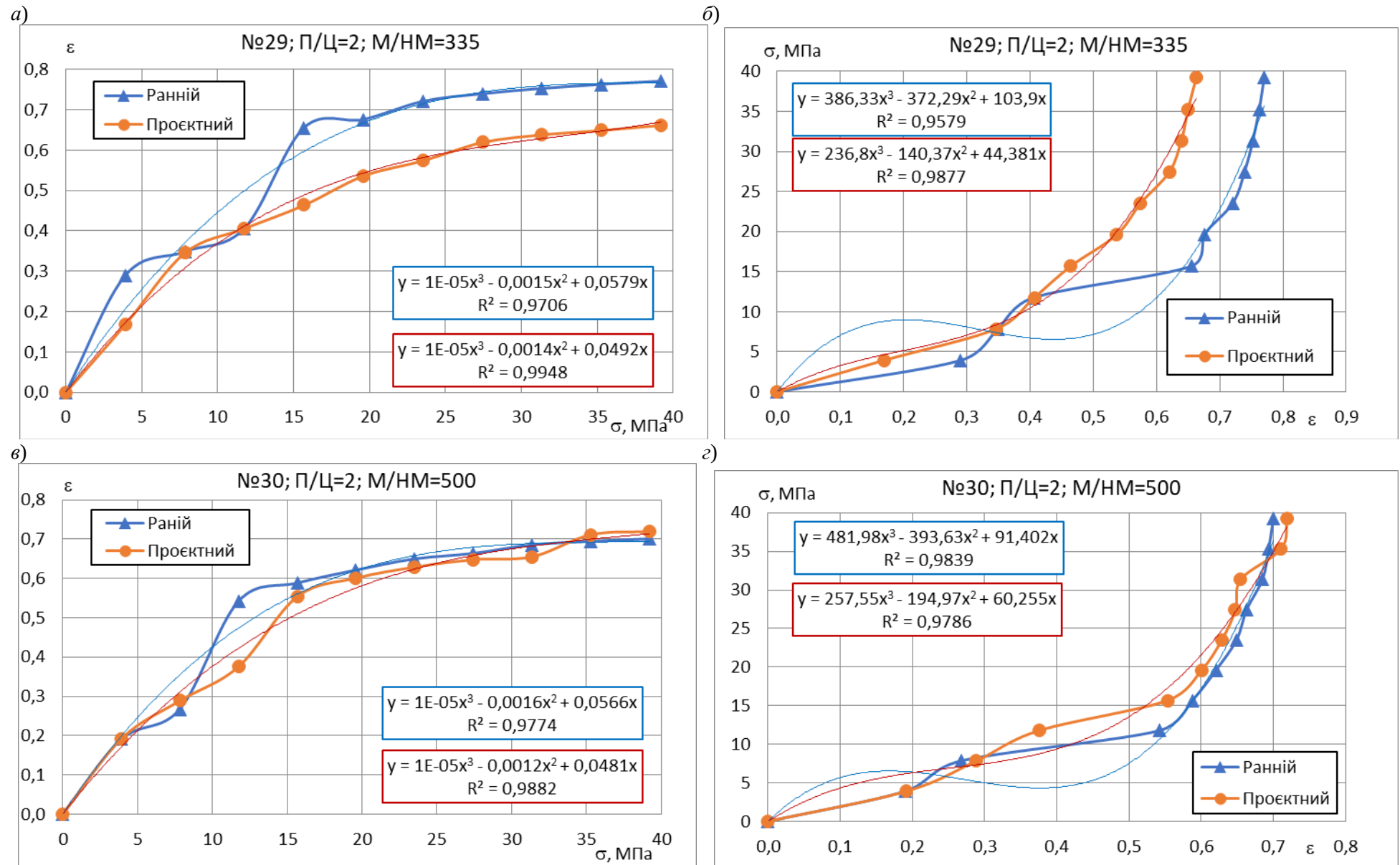


Рисунок Б.17 – Криві деформування зразків №29 (а, б) і №30 (в, з) у форматі $\varepsilon = f(\sigma)$ (а, в) і $\sigma = f(\varepsilon)$ (б, з) у ранньому і проектному віці

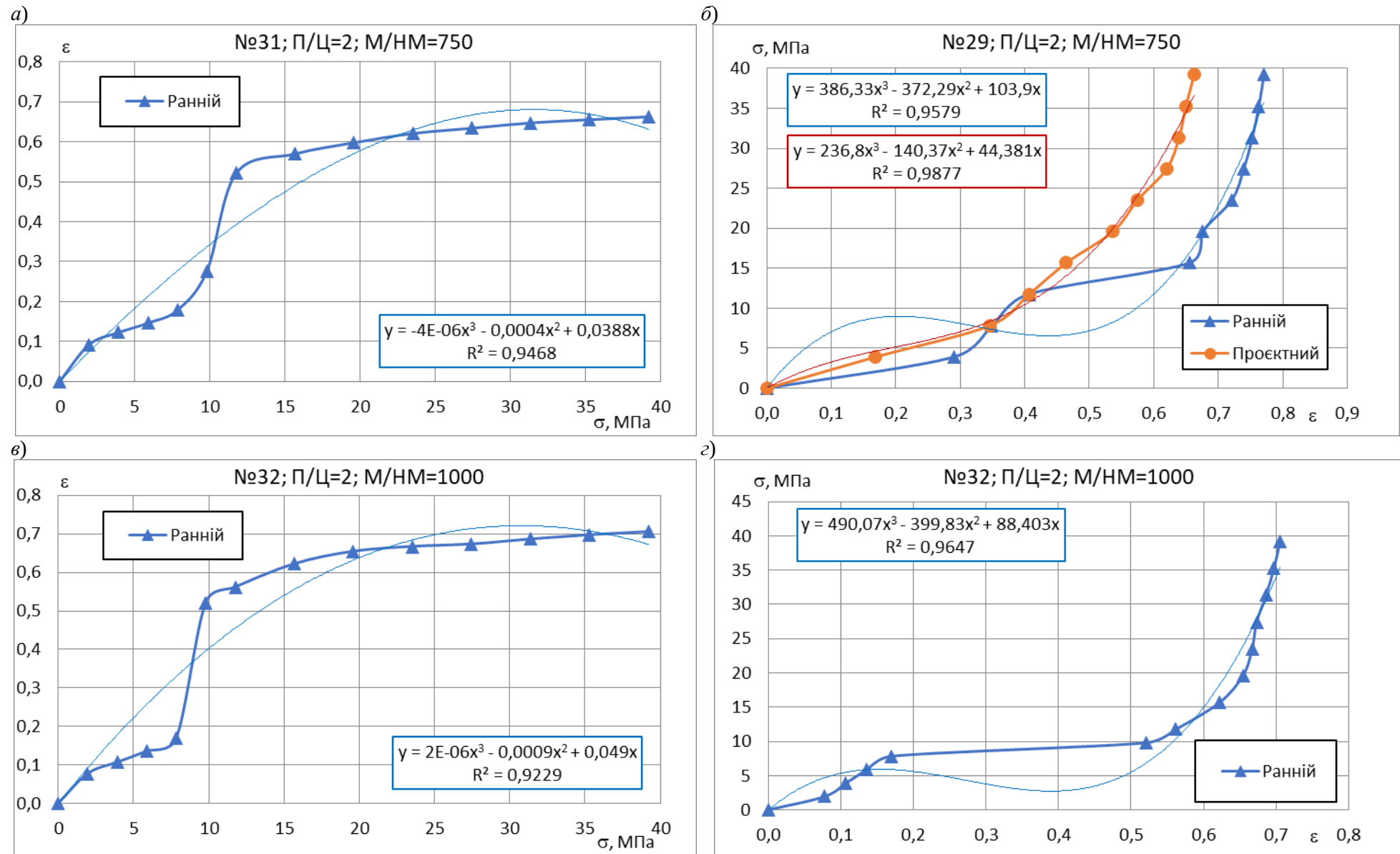


Рисунок Б.18 – Криві деформування зразків №31 (а, б) і №32 (в, г) у форматі $\varepsilon = f(\sigma)$ (а, в) і $\sigma = f(\varepsilon)$ (б, г) у ранньому і проектному віці

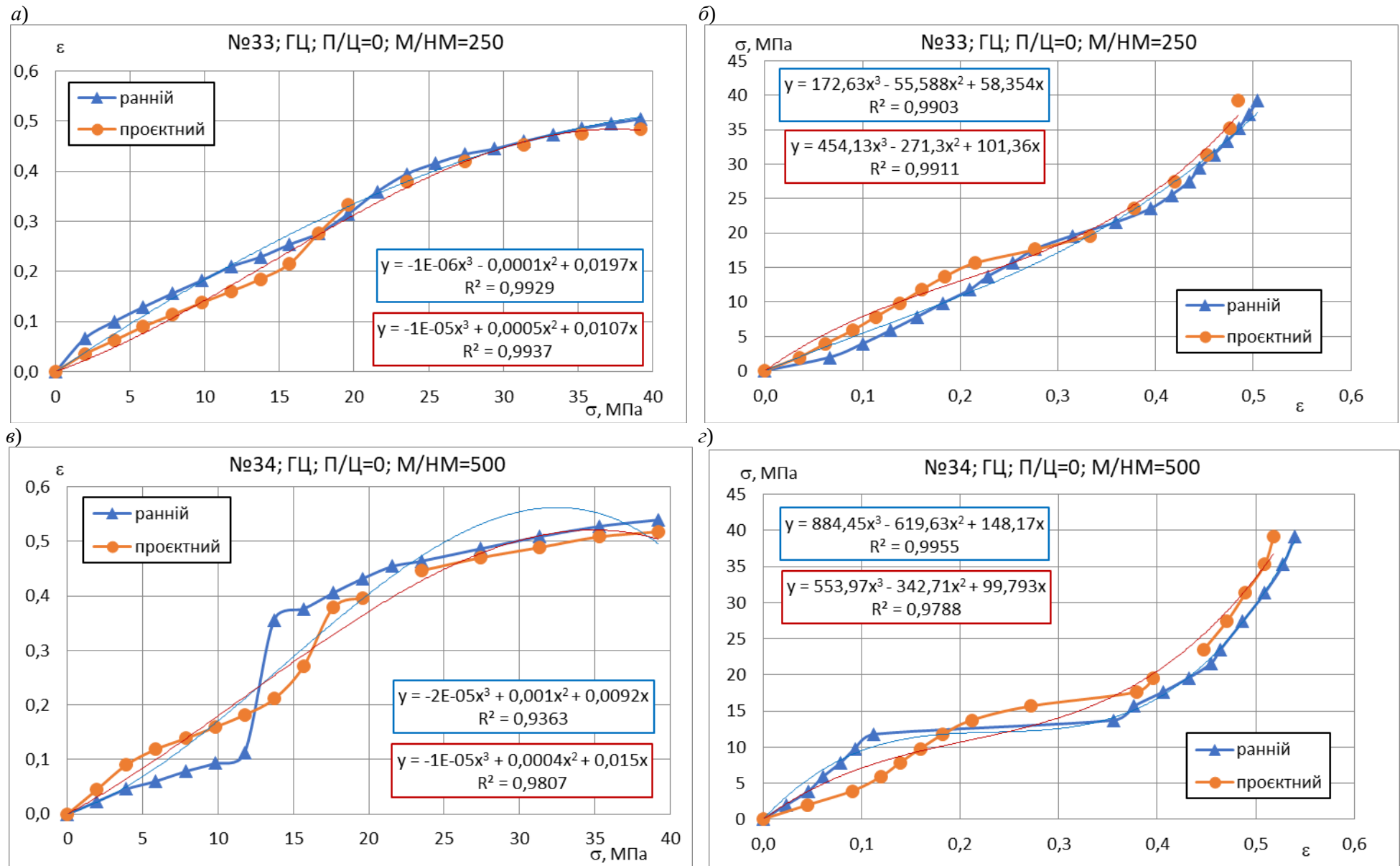


Рисунок Б.19 – Криві деформування зразків №33 (а, б) і №34 (в, з) у форматі $\varepsilon = f(\sigma)$ (а, в) і $\sigma = f(\varepsilon)$ (б, з) у ранньому і проєктному віці

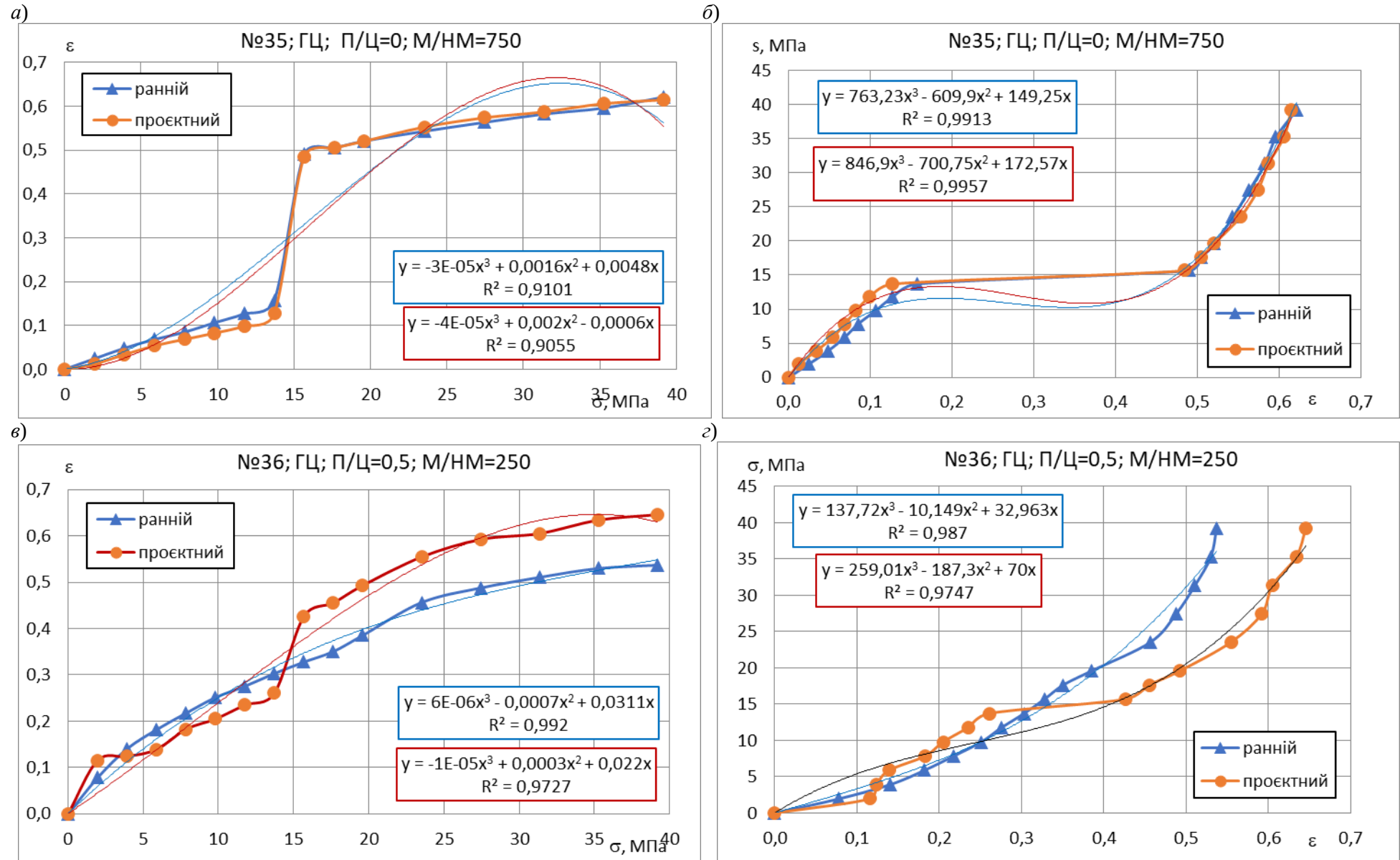


Рисунок Б.20 – Криві деформування зразків №35 (а, б) і №36 (в, г) у форматі $\varepsilon = f(\sigma)$ (а, в) і $\sigma = f(\varepsilon)$ (б, г) у ранньому і проєктному віці

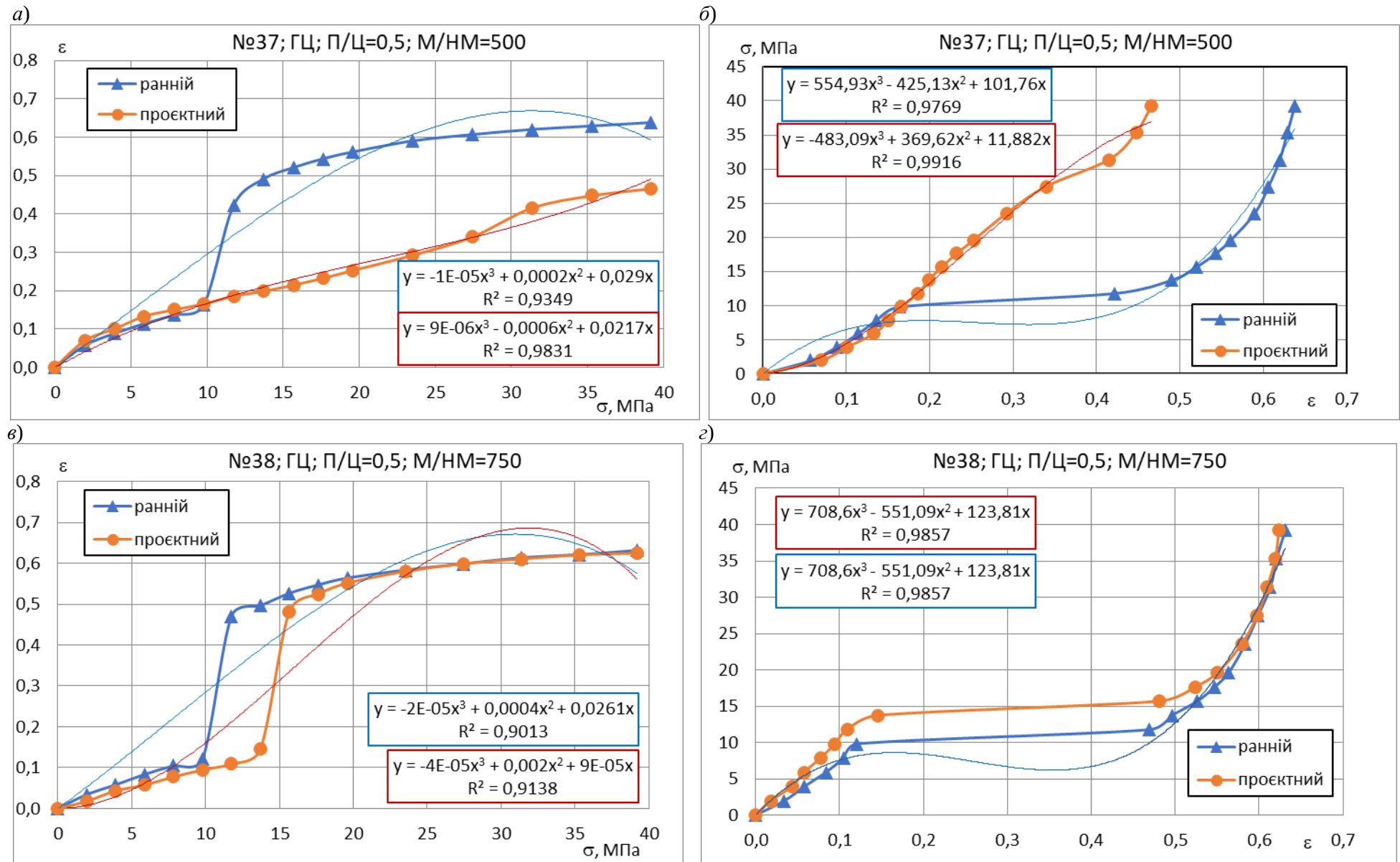


Рисунок Б.21 – Криві деформування зразків №37 (а, б) і №38 (в, г) у форматі $\epsilon = f(\sigma)$ (а, в) і $\sigma = f(\epsilon)$ (б, г) у ранньому і проєктному віці

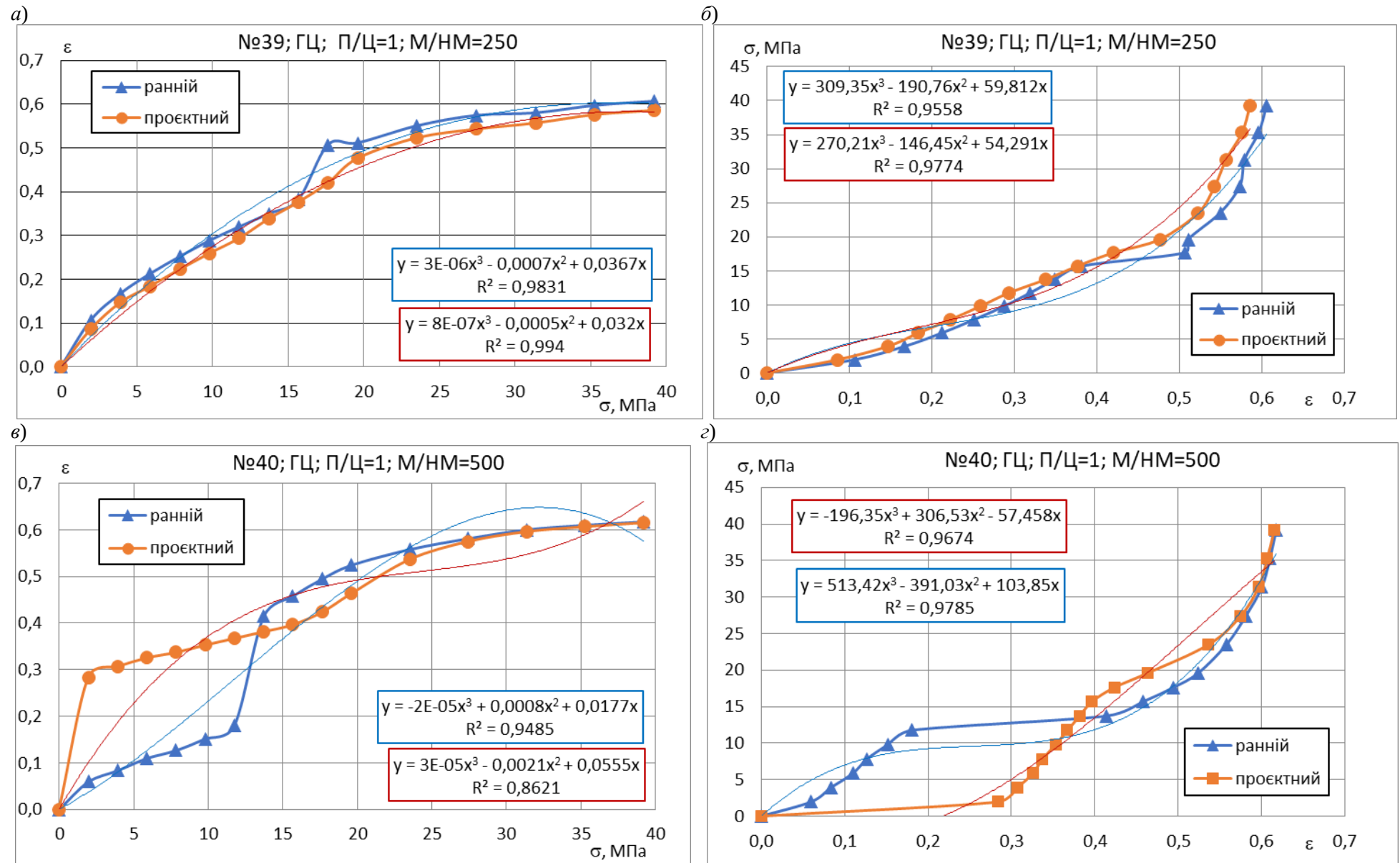


Рисунок Б.22 – Криві деформування зразків №39 (а, б) і №40 (в, г) у форматі $\varepsilon = f(\sigma)$ (а, в) і $\sigma = f(\varepsilon)$ (б, г) у ранньому і проєктному віці

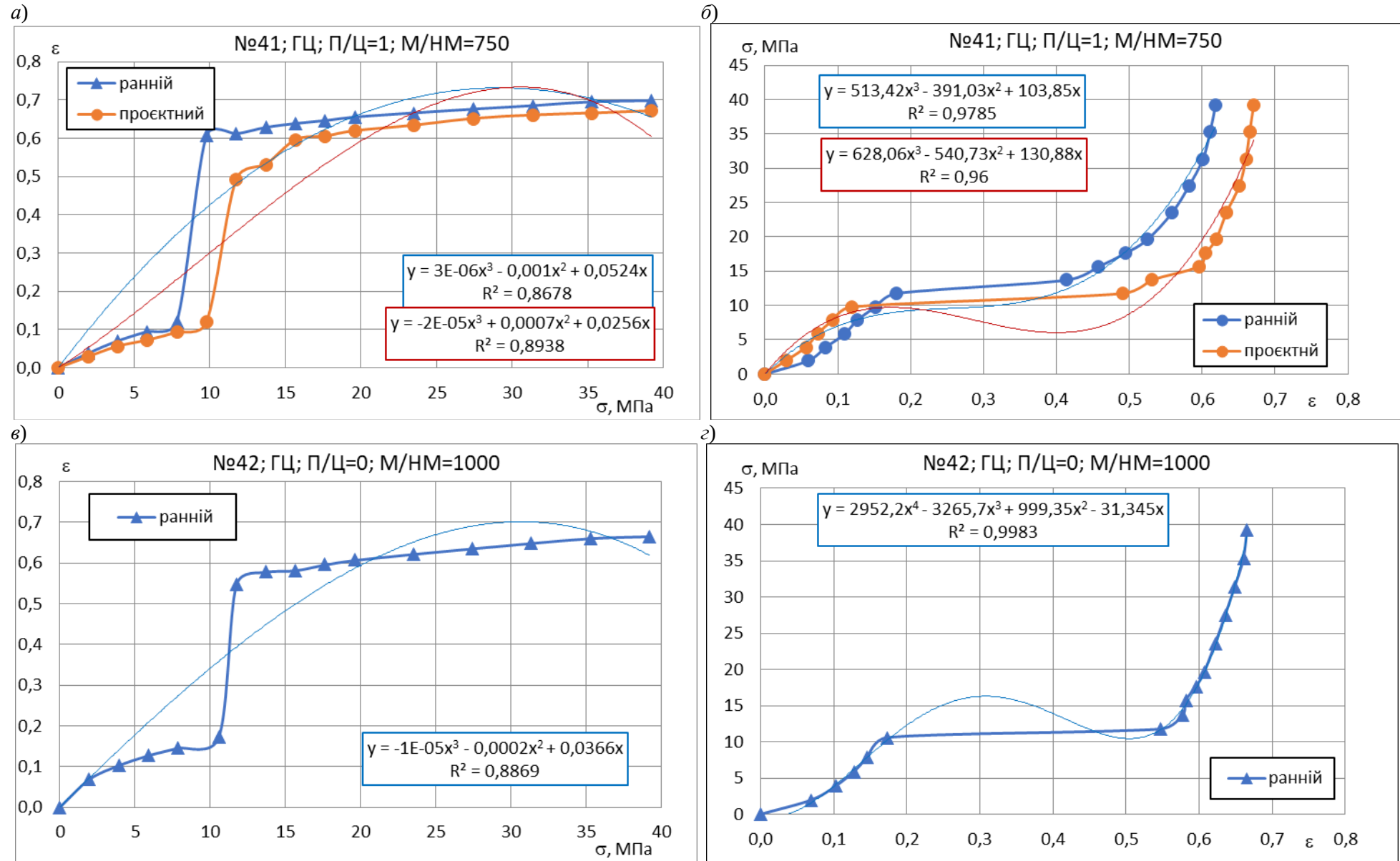


Рисунок Б.23 – Криві деформування зразків №41 (а, б) і №42 (в, г) у форматі $\epsilon = f(\sigma)$ (а, в) і $\sigma = f(\epsilon)$ (б, г) у ранньому і проєктному віці

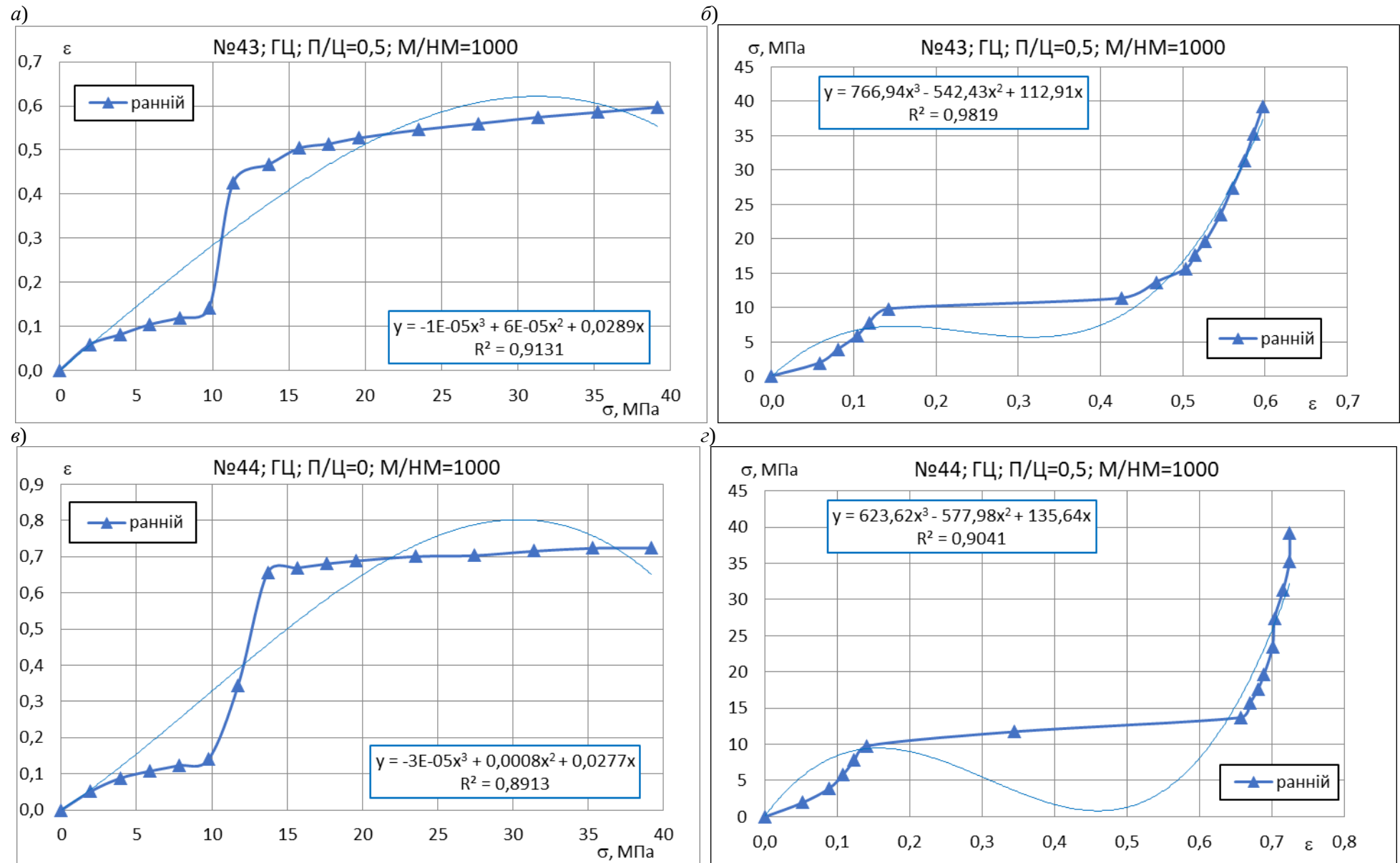


Рисунок Б.24 – Криві деформування зразків №43 (а, б) і №44 (в, г) у форматі $\varepsilon = f(\sigma)$ (а, в) і $\sigma = f(\varepsilon)$ (б, г) у ранньому і проєктному віці

ДОДАТОК В

Результати дослідження гідрофізичних властивостей
композиційних матеріалів

Таблиця В.1 – Результати дослідження водопоглинання та морозостійкості
дисперсно-армованого НМОС композиційного матеріалу
на портландцементі та глиноземистому цементі за методикою п. 2.6

Дата	№ циклу	Маса, г зразка композиційного матеріалу:								Водопоглинання за масою Wm, %, та зміна маси, %, зразків композиційного матеріалу										
		на портланд-цементі				на глиноземис-тому цементі				на портландцементі					на глиноземистому цементі					
		П1	П2	П3	П4	Г1	Г2	Г3	Г4	П1	П2	П3	П4	Псер	Г1	Г2	Г3	Г4	Гсер	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
11.03	водо-наси-чення	310	284	284	295	287	345	328	306	Водопоглинання за масою Wm, %										
		313	286	287	298	294	352	335	313	1,29	1,41	1,41	1,69	1,45	3,48	3,19	3,35	3,92	3,49	
		313	287	287	299	295	354	336	316											
		1	313	288	288	299	297	355	338											317
		2	314	288	288	299	297	356	338											318
12.03	3	314	288	288	300	297	356	339	318	Зміна маси після циклів, %,										
	4	314	288	288	300	297	356	339	318	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
	5	314	288	289	301	298	356	339	319	0,00	0,00	0,35	0,33	0,17	0,34	0,00	0,00	0,31	0,16	
	6	314	289	288	300	297	355	339	318	0,00	0,35	0,00	0,00	0,09	0,00	-0,28	0,00	0,00	-0,07	
	7	314	290	289	301	297	357	341	319	0,00	0,69	0,35	0,33	0,34	0,00	0,28	0,59	0,31	0,30	
13.03	8	315	291	289	302	296	357	341	319	0,32	1,04	0,35	0,67	0,59	-0,34	0,28	0,59	0,31	0,21	
	9	314	289	289	301	298	356	340	319	0,00	0,35	0,35	0,33	0,26	0,34	0,00	0,29	0,31	0,24	
	10	314	290	289	301	299	356	341	319	0,00	0,69	0,35	0,33	0,34	0,67	0,00	0,59	0,31	0,39	
	11	314	290	289	301	298	357	341	320	0,00	0,69	0,35	0,33	0,34	0,34	0,28	0,59	0,63	0,46	
	12	315	291	290	302	298	357	341	321	0,32	1,04	0,69	0,67	0,68	0,34	0,28	0,59	0,94	0,54	
14.03	13	316	291	289	301	298	357	341	320	0,64	1,04	0,35	0,33	0,59	0,34	0,28	0,59	0,63	0,46	
	14	315	290	290	302	298	358	342	320	0,32	0,69	0,69	0,67	0,59	0,34	0,56	0,88	0,63	0,60	
	15	315	290	289	303	298	357	341	321	0,32	0,69	0,35	1,00	0,59	0,34	0,28	0,59	0,94	0,54	
	16	315	291	290	303	300	358	342	321	0,32	1,04	0,69	1,00	0,76	1,01	0,56	0,88	0,94	0,85	
15.03	17	314	291	290	302	299	358	341	321	0,00	1,04	0,69	0,67	0,60	0,67	0,56	0,59	0,94	0,69	
	18	315	291	289	303	299	358	341	321	0,32	1,04	0,35	1,00	0,68	0,67	0,56	0,59	0,94	0,69	
	19	316	290	290	302	300	358	342	322	0,64	0,69	0,69	0,67	0,67	1,01	0,56	0,88	1,26	0,93	
	20	316	291	290	303	299	358	342	320	0,64	1,04	0,69	1,00	0,84	0,67	0,56	0,88	0,63	0,69	
16.03	21	316	291	290	303	299	358	342	320	0,64	1,04	0,69	1,00	0,84	0,67	0,56	0,88	0,63	0,69	
	22	315	291	290	303	299	358	342	321	0,32	1,04	0,69	1,00	0,76	0,67	0,56	0,88	0,94	0,77	
	23	315	291	290	303	299	358	342	320	0,32	1,04	0,69	1,00	0,76	0,67	0,56	0,88	0,63	0,69	
	24	316	291	290	302	300	358	344	321	0,64	1,04	0,69	0,67	0,76	1,01	0,56	1,47	0,94	1,00	
	25	316	291	290	302	300	359	344	321	0,64	1,04	0,69	0,67	0,76	1,01	0,84	1,47	0,94	1,07	

Кінець таблиці В1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
17.03	26	316	291	291	303	300	359	343	321	0,64	1,04	1,04	1,00	0,93	1,01	0,84	1,18	0,94	0,99
	27	316	291	290	303	300	359	343	321	0,64	1,04	0,69	1,00	0,84	1,01	0,84	1,18	0,94	0,99
	28	316	291	290	303	300	359	343	322	0,64	1,04	0,69	1,00	0,84	1,01	0,84	1,18	1,26	1,07
	29	315	292	290	303	300	360	343	322	0,32	1,39	0,69	1,00	0,85	1,01	1,12	1,18	1,26	1,14
18.03	30	316	291	290	303	300	360	343	322	0,64	1,04	0,69	1,00	0,84	1,01	1,12	1,18	1,26	1,14
	31	316	291	290	304	300	359	343	322	0,64	1,04	0,69	1,33	0,93	1,01	0,84	1,18	1,26	1,07
	32	316	291	290	303	300	359	343	322	0,64	1,04	0,69	1,00	0,84	1,01	0,84	1,18	1,26	1,07
	33	316	291	289	303	300	359	343	322	0,64	1,04	0,35	1,00	0,76	1,01	0,84	1,18	1,26	1,07
	34	316	291	290	303	300	359	343	322	0,64	1,04	0,69	1,00	0,84	1,01	0,84	1,18	1,26	1,07
19.03	35	315	291	289	303	300	359	344	322	0,32	1,04	0,35	1,00	0,68	1,01	0,84	1,47	1,26	1,15
	36	315	291	290	303	300	359	343	322	0,32	1,04	0,69	1,00	0,76	1,01	0,84	1,18	1,26	1,07
	37	315	291	290	303	300	359	343	322	0,32	1,04	0,69	1,00	0,76	1,01	0,84	1,18	1,26	1,07
	38	315	291	290	303	300	359	343	322	0,32	1,04	0,69	1,00	0,76	1,01	0,84	1,18	1,26	1,07
	39	315	291	289	303	300	359	342	322	0,32	1,04	0,35	1,00	0,68	1,01	0,84	0,88	1,26	1,00
20.03	40	315	291	290	303	300	359	343	322	0,32	1,04	0,69	1,00	0,76	1,01	0,84	1,18	1,26	1,07
	41	315	291	290	303	300	359	343	322	0,32	1,04	0,69	1,00	0,76	1,01	0,84	1,18	1,26	1,07
	42	315	291	290	303	300	359	343	322	0,32	1,04	0,69	1,00	0,76	1,01	0,84	1,18	1,26	1,07
	43	315	291	290	303	300	359	343	322	0,32	1,04	0,69	1,00	0,76	1,01	0,84	1,18	1,26	1,07
21.03	44	315	291	290	303	300	359	343	322	0,32	1,04	0,69	1,00	0,76	1,01	0,84	1,18	1,26	1,07
	45	315	291	290	303	300	359	343	322	0,32	1,04	0,69	1,00	0,76	1,01	0,84	1,18	1,26	1,07
	46	315	291	290	303	300	359	343	322	0,32	1,04	0,69	1,00	0,76	1,01	0,84	1,18	1,26	1,07
	47	315	291	290	303	300	359	343	322	0,32	1,04	0,69	1,00	0,76	1,01	0,84	1,18	1,26	1,07
	48	315	291	290	303	300	359	343	322	0,32	1,04	0,69	1,00	0,76	1,01	0,84	1,18	1,26	1,07
	49	315	291	290	303	300	359	343	322	0,32	1,04	0,69	1,00	0,76	1,01	0,84	1,18	1,26	1,07
22.03	50	315	291	290	303	300	359	343	322	0,32	1,04	0,69	1,00	0,76	1,01	0,84	1,18	1,26	1,07
	51	315	291	290	303	300	359	343	322	0,32	1,04	0,69	1,00	0,76	1,01	0,84	1,18	1,26	1,07
	52	315	291	290	303	300	359	343	322	0,32	1,04	0,69	1,00	0,76	1,01	0,84	1,18	1,26	1,07
	53	315	291	290	303	300	359	343	322	0,32	1,04	0,69	1,00	0,76	1,01	0,84	1,18	1,26	1,07
	54	315	291	290	303	300	359	343	322	0,32	1,04	0,69	1,00	0,76	1,01	0,84	1,18	1,26	1,07
23.03	54	315	291	290	303	300	359	343	322	0,32	1,04	0,69	1,00	0,76	1,01	0,84	1,18	1,26	1,07
	55	315	291	290	303	300	359	343	322	0,32	1,04	0,69	1,00	0,76	1,01	0,84	1,18	1,26	1,07
	56	315	291	290	303	300	359	343	322	0,32	1,04	0,69	1,00	0,76	1,01	0,84	1,18	1,26	1,07
	57	315	291	290	303	300	359	343	322	0,32	1,04	0,69	1,00	0,76	1,01	0,84	1,18	1,26	1,07
	58	315	291	290	303	300	359	343	322	0,32	1,04	0,69	1,00	0,76	1,01	0,84	1,18	1,26	1,07
24.03	59	315	291	290	303	300	359	343	322	0,32	1,04	0,69	1,00	0,76	1,01	0,84	1,18	1,26	1,07
	60	315	291	290	303	300	359	343	322	0,32	1,04	0,69	1,00	0,76	1,01	0,84	1,18	1,26	1,07
	61	315	291	290	303	300	359	343	322	0,32	1,04	0,69	1,00	0,76	1,01	0,84	1,18	1,26	1,07
	62	315	291	290	303	300	359	343	322	0,32	1,04	0,69	1,00	0,76	1,01	0,84	1,18	1,26	1,07
	63	315	291	290	303	300	359	343	322	0,32	1,04	0,69	1,00	0,76	1,01	0,84	1,18	1,26	1,07
25.03	64	315	291	290	303	300	359	343	322	0,32	1,04	0,69	1,00	0,76	1,01	0,84	1,18	1,26	1,07
	65	315	291	290	303	300	359	343	322	0,32	1,04	0,69	1,00	0,76	1,01	0,84	1,18	1,26	1,07
	66	315	291	290	303	300	359	343	322	0,32	1,04	0,69	1,00	0,76	1,01	0,84	1,18	1,26	1,07
	67	315	291	290	303	300	359	343	322	0,32	1,04	0,69	1,00	0,76	1,01	0,84	1,18	1,26	1,07

26.03	68	315	291	290	303	300	359	343	322	0,32	1,04	0,69	1,00	0,76	1,01	0,84	1,18	1,26	1,07
	69	315	291	290	303	300	359	343	322	0,32	1,04	0,69	1,00	0,76	1,01	0,84	1,18	1,26	1,07
27.03	70	315	291	290	303	300	359	343	322	0,32	1,04	0,69	1,00	0,76	1,01	0,84	1,18	1,26	1,07
	71	315	291	290	303	300	359	343	322	0,32	1,04	0,69	1,00	0,76	1,01	0,84	1,18	1,26	1,07
	72	315	291	290	303	300	359	343	322	0,32	1,04	0,69	1,00	0,76	1,01	0,84	1,18	1,26	1,07
	73	315	291	290	303	300	359	343	322	0,32	1,04	0,69	1,00	0,76	1,01	0,84	1,18	1,26	1,07
29.03	74	315	291	290	303	300	359	343	322	0,32	1,04	0,69	1,00	0,76	1,01	0,84	1,18	1,26	1,07
	75	315	291	290	303	300	359	343	322	0,32	1,04	0,69	1,00	0,76	1,01	0,84	1,18	1,26	1,07
	76	315	291	290	303	300	359	343	322	0,32	1,04	0,69	1,00	0,76	1,01	0,84	1,18	1,26	1,07
	77	315	291	290	303	300	359	343	322	0,32	1,04	0,69	1,00	0,76	1,01	0,84	1,18	1,26	1,07
	78	315	291	290	303	300	359	343	322	0,32	1,04	0,69	1,00	0,76	1,01	0,84	1,18	1,26	1,07
30.03	79	315	291	290	303	300	359	343	322	0,32	1,04	0,69	1,00	0,76	1,01	0,84	1,18	1,26	1,07
	80	315	291	290	303	300	359	343	322	0,32	1,04	0,69	1,00	0,76	1,01	0,84	1,18	1,26	1,07
	81	315	291	290	303	301	360	343	322	0,32	1,04	0,69	1,00	0,76	1,35	1,12	1,18	1,26	1,23
	82	315	291	290	303	301	360	343	322	0,32	1,04	0,69	1,00	0,76	1,35	1,12	1,18	1,26	1,23
31.03	83	315	291	290	303	301	360	343	322	0,32	1,04	0,69	1,00	0,76	1,35	1,12	1,18	1,26	1,23
	84	315	291	290	303	301	360	343	322	0,32	1,04	0,69	1,00	0,76	1,35	1,12	1,18	1,26	1,23
	85	315	291	290	303	301	360	343	322	0,32	1,04	0,69	1,00	0,76	1,35	1,12	1,18	1,26	1,23

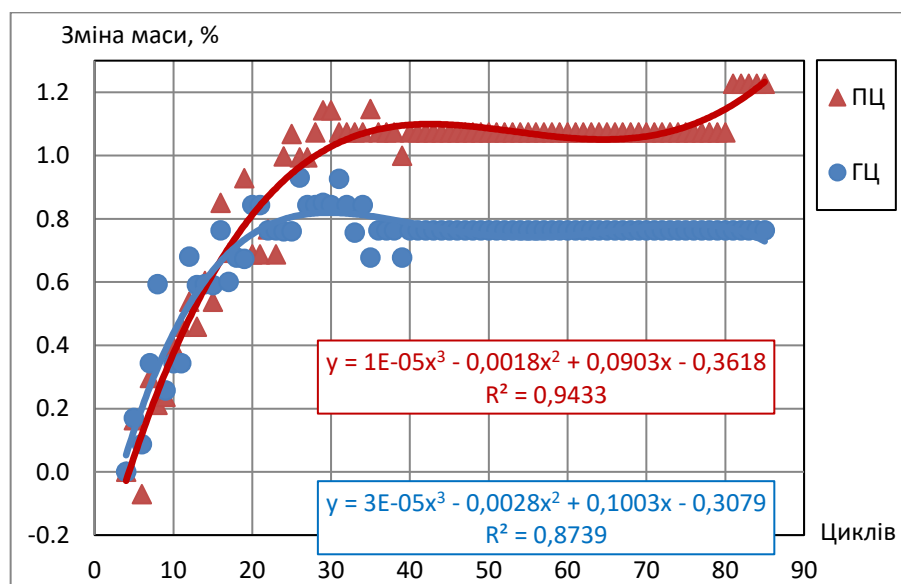


Рисунок В.1 – Кінетика зміни маси зразків дисперсно-армованого композиційного матеріалу на основі портландцементу (ПЦ) і глиноземистого цементу (ГЦ) за циклами поперемінного заморожування та відтавання



Рисунок В.2 – Зовнішній вигляд зразків дисперсно-армованого композиційного матеріалу на основі портландцементу (сірого кольору) і глиноземистого цементу (білого кольору) після 50 циклів поперемінного заморожування та відтавання. Ознак руйнування – лущення поверхні не спостерігається

ДОДАТОК Г
Патенти на корисну модель
та заявки на видачу патентів на винахід



(11) 153601	
(19) UA	(51) МПК E04B 5/10 (2006.01)
(21) Номер заявки: и 2022 04806 (22) Дата подання заявки: 19.12.2022 (24) Дата, з якої є чинними права інтелектуальної власності: 27.07.2023 (46) Дата публікації відомостей про державну реєстрацію та номер Бюлетеня: 26.07.2023, Бюл. № 30	(72) Винахідники: Плугін Андрій Аркадійович, UA, Муригіна Надія Олександрівна, UA, Мірошніченко Сергій Валерійович, UA, Костюк Тетяна Олександрівна, UA, Панченко Сергій Володимирович, UA, Ватуля Гліб Леонідович, UA, Плугін Дмитро Артурович, UA, Калінін Олег Анатолійович, UA, Плугін Олексій Андрійович, UA, Лобяк Олексій Вікторович, UA, Муригін Андрій Вікторович, UA, Дудін Олексій Аркадійович, UA (73) Володілець: УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ, майдан Фейєрбаха, 7, м. Харків-50, 61050, UA
(54) Назва корисної моделі: СПОСІБ УЛАШТУВАННЯ ПРОКЛАДНОГО ШАРУ МІЖ СТАЛЕВИМИ БАЛКАМИ ЗАЛІЗНИЧНОГО МОСТА І ЗАЛІЗОБЕТОННИМИ ПЛИТАМИ БЕЗБАЛАСТНОГО МОСТОВОГО ПОЛОТНА	
(57) Формула корисної моделі: Спосіб улаштування прокладного шару між сталевими балками залізничного моста і залізобетонними плитами безбаластного мостового полотна, який полягає в заготівлі та укладанні прокладного шару на верхню полицю сталевих балок перед укладанням плит, який відрізняється тим, що прокладний шар попередньо виготовляють у вигляді рулонів із нетканого матеріалу об'ємної структури, цементу, дрібного заповнювача і добавок-прискорювачів твердіння, на верхню полицю балок встановлюють локальні опори висотою, рівною проектній товщині прокладного шару, рулонний матеріал просочують водою, розкочують, укладають в декілька шарів загальною товщиною, на 30-60 % більшою проектної товщини прокладного шару, та ущільнюють вагою плит безбаластного мостового полотна шляхом їх укладання в проектне положення.	

Рисунок Г.1 – Патент на корисну модель № 153601



(11) 155132

(19) UA

(21) Номер заявки: **u 2023 04061**

(22) Дата подання заявки: **28.08.2023**

(24) Дата, з якої є чинними права інтелектуальної власності: **18.01.2024**

(46) Дата публікації відомостей про державну реєстрацію та номер Бюлетеня: **17.01.2024, Бюл. № 3**

(51) МПК
E04B 5/10 (2006.01)

(72) Винахідники:
Плугін Андрій Аркадійович, UA,
Муригіна Надія Олександрівна, UA,
Муригін Андрій Вікторович, UA,
Панченко Сергій Володимирович, UA,
Плугін Дмитро Артурович, UA,
Чжи Веньзон, GB,
Плугін Олексій Андрійович, UA,
Дудін Олексій Аркадійович, UA,
Муригін Максим Андрійович, UA,
Мусієнко Сергій Миколайович, UA

(73) Володілець:
УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ,
площа Фейєрбаха, 7, м. Харків-50, 61050, UA

(54) Назва корисної моделі:

СПОСІБ РЕМОНТУ БЕЗБАЛАСТНОГО МОСТОВОГО ПОЛОТНА ЗАЛІЗНИЧНИХ МОСТІВ ІЗ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ПЛИТ

(57) Формула корисної моделі:

Спосіб ремонту безбаластного мостового полотна залізничних мостів із залізобетонних плит, який полягає в заготівлі швидкотверднучого рулонного композиційного матеріалу для прокладного шару із нетканого матеріалу об'ємної структури, мінеральної в'язкої речовини та дрібного заповнювача, його просоченні водою, розкочуванні та поміщенні на балки моста, який відрізняється тим, що як мінеральну в'язку речовину використовують швидкотверднучий глиноземистий цемент, у композиційний матеріал додають добавку - інгібітор корозії сталі, пошкоджений прокладний шар під плитою видаляють за допомогою механізованого інструмента без відкріплення рейок від плит і плит від балок та без їх підняття, рулонний композиційний матеріал щільно пошарово набивають у зазор між плитою та балкою, забезпечуючи його обтіснення на 20-40 % висоти.

Сторінка 3 із 4

Рисунок Г.2 – Патент на корисну модель № 155132

Форм В4

МІНЕКОНОМІКИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ

**ДЕРЖАВНА ОРГАНІЗАЦІЯ
«УКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ОФІС
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ ТА ІННОВАЦІЙ»
(УКРІНОВІ)**

вул. Г.Плеханова, буд. 1, м. Київ, 01601, тел.: +380 44 209-27-06, +380 67 501-05-95
e-mail: office@ipro.gov.ua, http://www.ipro.gov.ua, код згідно з ЄДРПОУ 44673629

08.02.2023 № 1025/3A/23

Стосується заявки № а 2022 04805

/ при листуванні просимо посилається на цей № /

Адреса для листування

УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ ЗАЛІЗНИЧНОГО
ТРАНСПОРТУ, НАУКОВО-ДОСЛІДНА
ЧАСТИНА, площа Фейсрбаха, буд. 7, кв. 1-
318, м. Харків, 61050

**Повідомлення про встановлення дати подання заявки на винахід (корисну
модель)**

(21) Реєстраційний номер заявки а 2022 04805

(71) Заявник(и)

УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

(54) Назва винаходу

**СПОСІБ УЛАШТУВАННЯ ПРОКЛАДНОГО ШАРУ МІЖ СТАЛЕВИМИ
БАЛКАМИ ЗАЛІЗНИЧНОГО МОСТУ І ЗАЛІБЕТОННИМИ ПЛІТАМИ
БЕЗБАЛАСНОГО МОСТОВОГО ПОЛОТНА**

Матеріали заявки відповідають вимогам статті 13 Закону України «Про охорону прав на винаходи і корисні моделі» (далі - Закон) щодо встановлення дати подання заявки на дату одержання Державною організацією «Український національний офіс інтелектуальної власності та інновацій»:

- матеріалів заявки

Дата подання заявки **19.12.2022**

Начальник сектору встановлення дати подання заявок

Любов ЛУЦЕНКО

Телефон

494-05-98

Провідний експерт

Людмила ЯВОРСЬКА

Форм В4

МІНЕКОНОМІКИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ
ДЕРЖАВНА ОРГАНІЗАЦІЯ
«УКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ОФІС
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ ТА ІННОВАЦІЙ»
(УКРНОІВІ)

вул. Дягилі Голдєва, 1, м. Київ, 01601, тел.: +380 44 209-27-06, +380 67 501-05-95
 e-mail: office@uipo.gov.ua, http://www.uipo.gov.ua, код згідно з ЄДРПОУ 44673629

18.10.2023 № 17317/3А/23

Стосується заявки № а 2023 04060
 / при листуванні просимо посилається на цей № /

Адреса для листування
 УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ
 УНІВЕРСИТЕТ ЗАЛІЗНИЧНОГО
 ТРАНСПОРТУ, НАУКОВО-ДОСЛІДНА
 ЧАСТИНА, вул. Фейєрбаха, буд. 7, кім. 1-
 318, м. Харків, 61050

Повідомлення про встановлення дати подання заявки на винахід (корисну модель)

(21) Реєстраційний номер заявки а **2023 04060**

(71) Заявник(и)

УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

(54) Назва винаходу

СПОСІБ РЕМОНТУ БЕЗБАЛАСТНОГО МОСТОВОГО ПОЛОТНА ЗАЛІЗНИЧНИХ МОСТІВ ІЗ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛІМЕНТІВ

Матеріали заявки відповідають вимогам статті 13 Закону України «Про охорону прав на винаходи і корисні моделі» (далі – Закон) щодо встановлення дати подання заявки на дату одержання Державною організацією «Український національний офіс інтелектуальної власності та інновацій»:

- матеріалів заявки

Дата подання заявки **28.08.2023**

Начальник сектору встановлення дати подання заявок

Любов ЛУЦЕНКО

Телефон 494-05-98

Провідний експерт

Людмила ЯВОРСЬКА

12301000020236400000086168711023

Рисунок Г.3 – Повідомлення про встановлення дати подання заявок на винаходи № а 2022 04805 і № а 2023 04060

ДОДАТОК Д

Міністерство освіти та науки України
Український державний університет залізничного транспорту

Затверджено:

Проректор за науково-педагогічної
роботи УкрДУЗТ

к.т.н., доц.

Арту́р КАГРАМА́НЯН

12.12.2024



ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РЕГЛАМЕНТ

ремонту безбаластного мостового полотна
із залізобетонних плит з частковою заміною прокладного шару
швидкотверднучим рулонним композиційним матеріалом

Розроблено:

Зав. кафедри залізничної колії
і транспортних споруд

д.т.н., проф.

Андрій ПЛУГІН

11.12.2024

Старший викладач кафедри залізничної колії
і транспортних споруд

Надія МУРИГІНА

10.12.2024

Харків 2024

Зміст

Вступ	3
1 Заготівлення рулонного композиційного матеріалу	4
1.1 Матеріали для рулонного композиційного матеріалу	4
1.2 Склад рулонного композиційного матеріалу	5
1.3 Оснащення	5
1.4 Приготування рулонного композиційного матеріалу	5
2 Проведення ремонту з частковою заміною прокладного шару швидкоотверднучим рулонним композиційним матеріалом	7
2.1 Інструмент і оснащення	7
2.2 Проведення робіт	7

Вступ

Технологічний регламент розроблено згідно з Патентом на корисну модель №155132 UA «Спосіб ремонту безбаластного мостового полотна залізничних мостів із залізобетонних плит» за результатами держбюджетної науково-дослідної роботи Українського державного університету залізничного транспорту ДР№ 0122U002125 «Теоретичні та експериментальні основи створення композиційних матеріалів на основі мінеральних в'язучих для захисту від електрокорозії і ремонту споруд залізничного транспорту» та результатами дисертаційного дослідження аспірантки кафедри залізничної колії і транспортних споруд УкрДУЗТ Надії Муригіної.

Технологічний регламент розповсюджується на ремонт безбаластного мостового полотна із залізобетонних плит на залізничних металевих мостах з частковою заміною прокладного зношеного гумодерв'яного прокладного шару швидкотверднучим рулонним композиційним матеріалом.

1 Заготівлення рулонного композиційного матеріалу

Для ремонту безбаластного мостового полотна із залізобетонних плит з частковою заміною прокладного шару застосовується один із двох видів рулонного композиційного матеріалу:

- РКМ-П на основі портландцементу з добавками-прискорювачами твердіння, що допускає повне навантаження мостового полотна без обмежень через 3 доби після ремонту;
- РКМ-Г на основі глиноземистого цементу, що допускає повне навантаження мостового полотна без обмежень через 1 добу після ремонту.

1.1 Матеріали для рулонного композиційного матеріалу

Нетканий матеріал об'ємної структури (сінтепон) із анізотрично орієнтованих поліефірних волокон товщиною 10 мм густиною 100 г/м².

Портландцемент ПЦ І-500Р-Н ДСТУ Б В.2.7-46:2010 (СЕМ І 42.5 R EN 197-1). Допускається ПЦ ІІ-А/В-500Р-Н (СЕМ ІІ/А-LL 42.5 R)

Цемент кальцієво-алюмінієвий (глиноземистий) ДСТУ Б EN 14647:2015 Isidac 40 (TS EN 14647, Çimsa, Туреччина).

Добавка – прискорювач твердіння натрію сульфат Na_2SO_4 .

Пісок для будівельних робіт ДСТУ Б В.2.7-32-95 з модулем крупності не більше 1,5.

Поліетиленова плівка.

1.2 Склад рулонного композиційного матеріалу

Таблиця 1

Компонент	Витрата компоненту на 1 м ² (1 пог. м стрічки шириною 200 мм) НМОС в композиційному матеріалі			
	РКМ-П	РКМ-П1	РКМ-Г	РКМ-Г1
Портландцемент	10 (2)	9 (1,8)		
Глиноземистий цемент			10 (2)	9 (1,8)
Пісок		1		1
Добавка-прискорювач	0,1 (0,02)	0,09 (0,036)		

У складах з доданою до позначення марки «1» допущена заміна 10 % цементу піском.

1.3 Оснащення

Електронні ваги 10 кг.

Змішувач для сухих сумішей об'ємом 2–10 л.

Дерев'яна форма-жолоб П-подібного поперечного перерізу з внутрішнім розміром 200×20 мм довжиною 1 м.

Пластикова ємність з ручкою об'ємом 2–5 л.

Ножиці.

Шило.

Пензель.

1.4 Приготування рулонного композиційного матеріалу

Із поліетиленової плівки нарізають смуги шириною 450 мм довжиною 1,1 м, шилом проколюють в них отвори в кількості 5–10 шт. на 10 см². Смугу укладають у форму-жолоб (рис. 1, а).

Із НМОС нарізають стрічки шириною 200 мм довжиною 1 м і укладають у форму-жолоб (рис. 1, б).

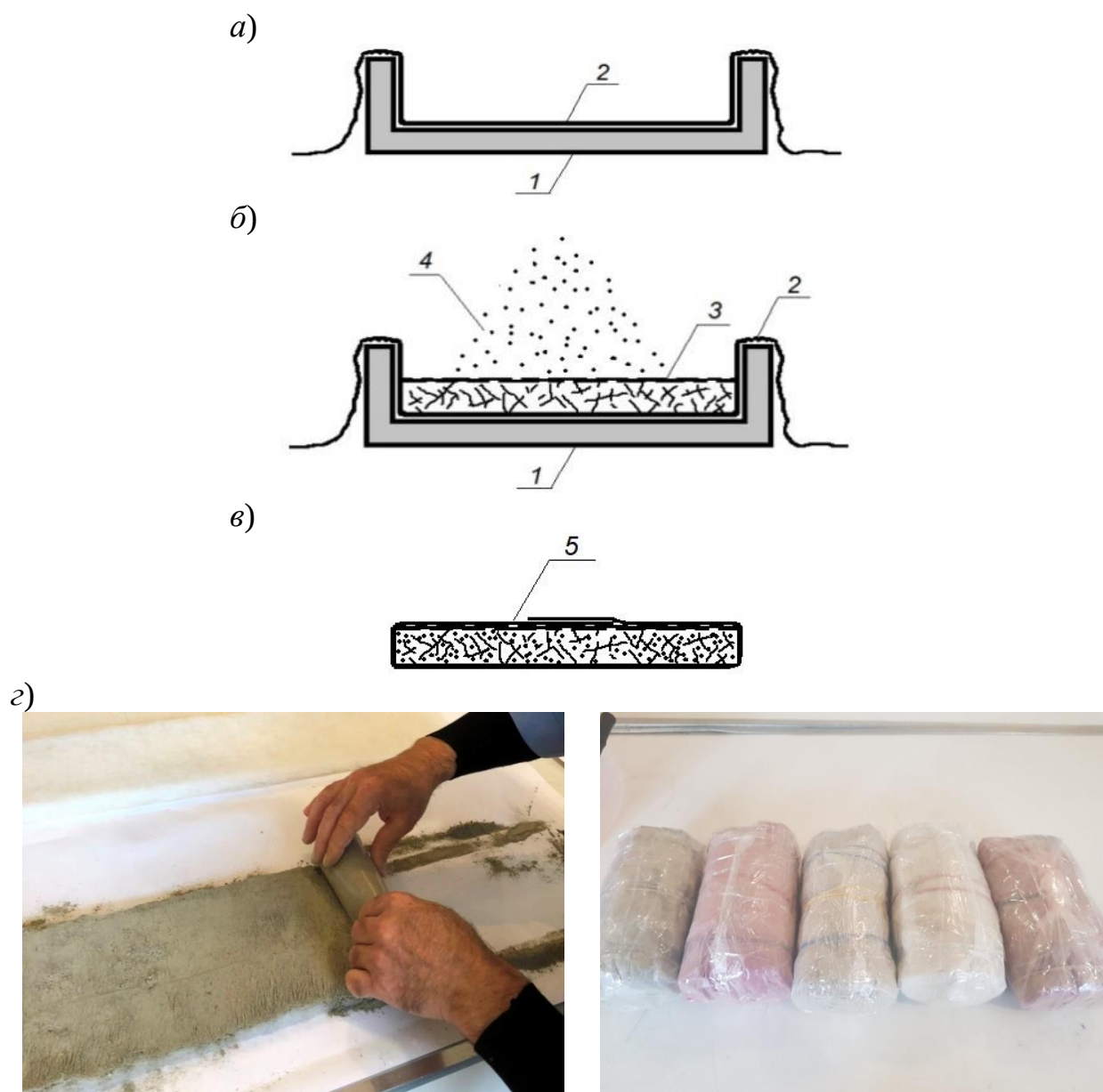


Рис. 1 Приготування рулонного композиційного матеріалу:

a – вкладання у форму-жолоб поліетиленової плівки; *б* – укладання у форму стрічки НМОС і заповнення сумішшю; *в* – виділення композиції із форми і загортання у плівку; *г* – згортання композиційного матеріалу в рулон; 1 – форма; 2 – поліетиленова плівка; 3 – НМОС; 4 – мінеральна суміш; 5 – готова для згортання смуга

Компоненти суміші зважують в кількості, вказаній у табл. 1, висипають у змішувач і ретельно перемішують впродовж не менше 3 хвилин.

Суміш повільно та рівномірно насипають на НМОС (рис. 1, б) в кількості, зазначеній у табл. 1, і розрівнюють пензлем до видимого припинення проникнення суміші вглиб НМОС.

Краї плівки загортають і накривають НМОС із сумішшю зверху (рис. 1, в), після чого згортають у рулон (рис. 1, г).

2 Проведення ремонту з частковою заміною прокладного шару швидкотверднучим рулонним композиційним матеріалом

2.1 Інструмент і оснащення

Електричний перфоратор з робочим органом – долотом.

Пластикова ємність об'ємом 2–5 л з водою.

Металева щітка.

Металевий або дерев'яний товкачик.

2.2 Проведення робіт

Роботи виконують за середньодобової температури не нижче 10°C без припинення руху поїздів з обмеженням швидкості 25 км/год.

Заміна прокладного шару здійснюється захватками довжиною не більше 1 м. Сусідню захватку допускається замінювати після затвердіння попередньої захватки.

Пошкоджений прокладний шар під плитою видаляють за допомогою механізованого інструменту без відкріплення рейок від плит і плит від балок та без їх підняття. Допускається залишати міцні щільні фрагменти старого прокладного шару загальною площею не більше 20 % в плані ремонтуваної ділянки. Поверхню полиці балки очищують металевою щіткою.

Рулони композиційного матеріалу занурюють у ємність з водою та витримують 5 хв до повного просочення матеріалу.

Рулони розкочують, розгортають плівку, композиційний матеріал видаляють із неї та щільно пошарово горизонтальними шарами набивають у зазор між плитою та балкою (рис. 2), забезпечуючи його обтиснення на 20-40 % висоти та ущільнюючи товкачиком.

Матеріал твердіє і утворює композиційний прокладний шар. Навантаження безбаластного мостового полотна без обмежень допускається для матеріалу марки РКМ-П – через 3 доби, РКМ-Г – через 1 добу після завершення ремонту.

а)

б)

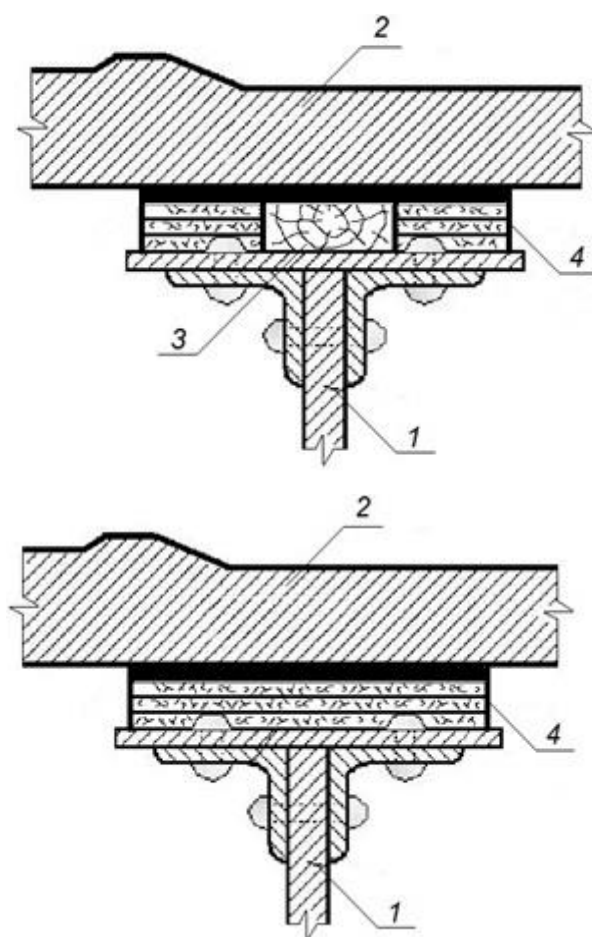


Рис. 2 Схема укладання шарів рулонного композиційного матеріалу в місцях:
а – частково залишеного старого прокладного шару; *б* – повністю видаленого старого прокладного шару; 1 – балка мосту; 2 – плита БМП; 3 – фрагмент старого прокладного шару; 4 – шари рулонного композиційного прокладного шару

ДОДАТОК Е
АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Начальник структурного підрозділу
«Служба колії» регіональної філії
«Південна залізниця»
АТ «Укрзалізниця»

АТ «Укрзалізниця»



Андрій МІНЧЕНКО

«21» лютого 2025

АКТ

впровадження способу ремонту безбаластного мостового полотна
із залізобетонних плит з частковою заміною прокладного шару
швидкотвердіючим рулонним композиційним матеріалом
згідно патенту України на корисну модель №155132

м. Харків

20.02.2025

Ми, що підписалися нижче:

- від виробничого підрозділу «Харківська дистанція колії»(ПЧ-3) регіональної філії «Південна залізниця» АТ «Укрзалізниця» – начальник виробничого підрозділу Федір СЕДЯКІН, головний інженер виробничого підрозділу Сергій НЕШЛЮБЕНКО,

- від кафедри залізничної колії і транспортних споруд Українського державного університету залізничного транспорту (УкрДУЗТ) – завідувач кафедри д.т.н., проф. Андрій ПЛУГІН, старша викладачка, аспірантка Надія МУРИГІНА – представники авторського колективу «Способу ремонту безбаластного мостового полотна залізничних мостів із залізобетонних плит» (патент України на корисну модель №155132) та автори розробленого на основі цього патенту «Технологічного регламенту ремонту безбаластного мостового полотна із залізобетонних плит з частковою заміною прокладного шару швидкотвердіючим рулонним композиційним матеріалом» склали цей акт про те, що за станом на 20.02.2025 виробничим підрозділом «Харківська дистанція колії» регіональної філії «Південна залізниця» АТ «Укрзалізниця» розглянуто і прийнято для впровадження від Українського державного університету залізничного транспорту «Технологічний регламент ремонту безбаластного мостового полотна із залізобетонних плит з частковою заміною прокладного шару швидкотвердіючим рулонним композиційним матеріалом».

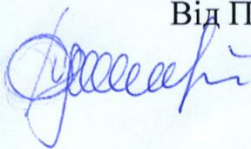
Зазначені «Спосіб ремонту...» і «Технологічний регламент» розроблено за результатами держбюджетної науково-дослідної роботи Українського державного університету залізничного транспорту «Теоретичні та

експериментальні основи створення композиційних матеріалів на основі мінеральних в'язучих для захисту від електрокорозії і ремонту споруд залізничного транспорту» (ДР№0122U002125) і дисертаційного дослідження аспірантки Надії МУРИГІНОЇ.

Згідно із зазначеним «Технологічним регламентом» на літній період 2025 року заплановано поточний ремонт безбаластного мостового полотна з дефектним прокладним шаром мосту на ділянці обслуговування ПЧ-3 силами мостового цеху дистанції колії. Географічне положення мосту у відкритому доступі не повідомляється.

Впровадження «Способу ремонту безбаластного мостового полотна залізничних мостів із залізобетонних плит» (патент України на корисну модель №155132) шляхом виконання ремонту згідно з «Технологічним регламентом ремонту безбаластного мостового полотна із залізобетонних плит з частковою заміною прокладного шару швидкотвердіючим рулонним композиційним матеріалом» забезпечить соціально-економічний ефект за рахунок збільшення міжремонтного періоду безбаластного мостового полотна з 10–15 до 10–25 років, збільшення довговічності безбаластного мостового полотна в цілому з 10–15 до 20–40 років.

Від ПЧ-3:



Федір СЕДЯКІН



Сергій НЕШЛЮБЕНКО

Від УкрДУЗТ:



Андрій ПЛУГІН



Надія МУРИГІНА

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Проректор з науково-педагогічної роботи
Українського державного університету
залізничного транспорту

к.т.н., доцент

Владислав ПАНЧЕНКО



2025 р.

ДОВІДКА

про впровадження результатів дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора філософії МУРИГІНОЇ Надії Олександрівни
«Дисперсно-армований матеріал для прокладного шару
залізничного безбаластного мостового полотна»

Результати дисертаційного дослідження Надії МУРИГІНОЇ використані у навчальному процесі за спеціальностями 273 Залізничний транспорт, 192 Будівництво та цивільна інженерія, освітніми програмами всіх освітніх рівнів «Залізничні споруди та колійне господарство», «Промислове та цивільне будівництво» в курсах: «Сучасні технічні рішення щодо підвищення надійності елементів залізничної колії», «Модифікація бетонів і будівельних розчинів хімічними та мінеральними добавками і полімерами», «Фізико-хімічна механіка будівельних матеріалів і конструкцій», «Улаштування, експлуатація та реконструкція інженерних споруд», «Відновлення експлуатаційних властивостей, захист конструкцій та споруд», у дипломному проєктуванні.

Результати дисертаційного дослідження Надії МУРИГІНОЇ використані у науково-дослідній роботі «Теоретичні та експериментальні основи створення композиційних матеріалів на основі мінеральних в'язучих для захисту від електрокорозії і ремонту споруд залізничного транспорту» (ДР№ 0122U002125), що виконувалась УкзДУЗТ у 2022–23 рр. за кошти державного бюджету України.

Декан будівельного факультету
к.т.н., доцент

Олексій ДУДІН