

УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЗАЛІЗНИЧНОГО
ТРАНСПОРТУ
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

МУРИГІН МАКСИМ АНДРІЙОВИЧ

УДК 625.142:691.32:691.175

ДИСЕРТАЦІЯ

ЗАЛІЗНИЧНІ ШПАЛИ ІЗ БЕТОНУ З КОМПОЗИТНОЮ АРМАТУРОЮ

273 Залізничний транспорт

27 Транспорт

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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



Максим МУРИГІН

Науковий керівник

ПЛУГІН Андрій Аркадійович,
доктор технічних наук, професор

Харків – 2026

АНОТАЦІЯ

Муригін Максим Андрійович. Залізничні шпали із бетону з композитною арматурою. Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 273 Залізничний транспорт (27 Транспорт). Український державний університет залізничного транспорту Міністерства освіти і науки України, Харків, 2026.

Дисертація виконана на кафедрі залізничної колії і транспортних споруд Українського державного університету залізничного транспорту і складається із вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку із 120 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, робочу гіпотезу, завдання досліджень, викладено положення наукової новизни, обґрунтовано достовірність і практичне значення отриманих результатів, наведено дані про їх апробацію.

У теперішній час на залізницях світу використовуються різні конструкції підрейкових основ із різних матеріалів. Оскільки умови експлуатації залізниць постійно змінюються – зростають швидкості руху, осьові навантаження, вантажонапруженість, змінюються і нормативні вимоги до конструкцій підрейкових основ та матеріалів для їх виготовлення. З ХІХ по середину ХХ століття практично єдиною масовою підрейковою основою були дерев'яні шпали. Однак у зв'язку з очевидними недоліками деревини для експлуатації в умовах змінної вологості – великими вологісними деформаціями, низькою біостійкістю, з другої половини ХХ століття їх активно витісняють попередньо напружені залізобетонні шпали. Однак залізобетонні шпали також мають ряд недоліків, в основному обумовлених корозійною вразливістю арматури та бетону. Вже у ХХІ столітті з'являються

композитні шпали, які позбавлені багатьох недоліків дерев'яних і залізобетонних шпал, все більшого поширення набуває композитна арматура для армування бетон, що має ряд переваг над сталевією арматурією. Однак вони поки не знаходять широкого застосування і дерев'яні та залізобетонні шпали досі є наймасовішими. Багатьох недоліків можуть бути позбавлені бетонні шпали, армовані композитною арматурією. Серед їх переваг можна відзначити захищеність полімеру бетоном від ультрафіолетового випромінювання, високу корозійну стійкість арматури. Заміна сталевієї арматури корозійностійкою композитною арматурією дозволить знизити вимоги до тріщиностійкості шпал і зменшити зусилля попереднього натягу або відмовитись від нього. Це дозволить оптимізувати вимоги до ранньої міцності бетону, зменшити ушкоджувальність шпал при експлуатації за рахунок зниження напруг, що розтягують, у поперечному напрямку. Виходячи з викладеного створення теоретичних та експериментальних основ виробництва та експлуатації залізничних шпал із бетону з покращеними електричними властивостями та електрокорозійною стійкістю за рахунок застосування композитної арматури, розробка на їх основі конструкції, технології виробництва, вказівок з експлуатації бетонних шпал, армованих композитною арматурією, є актуальним завданням.

Актуальність підкреслюється виконанням досліджень у складі держбюджетних науково-дослідних робіт МОН України.

Метою дослідження є створення теоретичних та експериментальних основ виробництва та експлуатації залізничних шпал із бетону з покращеними електричними властивостями та електрокорозійною стійкістю за рахунок застосування композитної арматури.

Об'єкт дослідження – напружено-деформований стан, електричні властивості, електрокорозійні процеси та їхні наслідки у залізничних шпалах із бетону з композитною та сталевією дротяною арматурією.

Предмет дослідження – залізничні шпали із бетону з композитною та сталевією дротяною арматурією та їхні моделі.

Робоча гіпотеза – заміна в попередньо напружених шпалах із бетону сталеві дротяної арматури композитною дозволить підвищити електричний опір, знизити втрату тягових струмів і струмів витоку, запобігти електрокорозійним та корозійним процесам.

Завдання досліджень:

- виконати аналітичний огляд джерел щодо умов експлуатації та пошкоджуваності залізобетонних шпал, а також можливості заміни сталеві дротяної арматури композитною;

- розробити методику дослідження і порівняльного аналізу напружено-деформованого стану шпал із бетону з попередньо напруженою сталеві та композитною арматурою на моделях;

- розробити методики порівняльного дослідження електричних властивостей шпал із бетону зі сталеві та композитною арматурою, впливу на них постійного та пульсуючого однонаправленого електричних потенціалів та агресивних середовищ на моделях;

- виконати розрахунковий і натурний експерименти з навантаженням моделей шпал із бетону з попередньо напруженою композитною та сталеві дротяною арматурою, а також порівняльний аналіз результатів розрахункового та натурального експериментів;

- дослідити електричні властивості моделей шпал із бетону з композитною та сталеві дротяною арматурою, виконати експеримент з їх експозицією під впливом постійного та пульсуючого однонаправленого електричних потенціалів та агресивних середовищ, дослідити наслідки цих впливів та виконати їх порівняльний аналіз;

- розробити рекомендації щодо конструкції і технології виготовлення шпал із бетону з композитною та сталеві арматурою.

В результаті проведених досліджень отримано нові наукові результати, зокрема набули подальшого розвитку уявлення про роботу і напружено-деформований стан під поїзним навантаженням шпал із бетону зі сталеві дротяною та композитною базальтопластиковою арматурою, в яких

попередньо напруженим є весь пакет арматури. Зокрема, вперше отримано залежності максимальних значень напружень у бетоні шпал з композитною арматурою під поїзним навантаженням від зусилля натягу арматурного пакету, діаграми деформування моделей таких шпал з різними зусиллями попереднього натягу арматурного пакету.

Набули подальшого розвитку уявлення про електричні властивості, корозійну та електрокорозійну поведінку шпал із бетону з композитною базальтопластиковою арматурою. Зокрема, вперше встановлено, що заміна сталеві дрітної арматури композитною обумовлює збільшення електричного опору шпали у 6–16 раз, проте призводить до електроміграційного вилугування бетону під впливом струмів витоку, для запобігання якому доцільно підвищення щільності а, отже, класу бетону.

Практичне значення отриманих результатів полягає у створенні теоретичних та експериментальних основ для конструювання, виробництва та експлуатації шпал із бетону з композитною арматурою, які матимуть кращі експлуатаційні якості порівняно зі шпалами зі сталеві дрітної арматурою, а також у наданні отриманих нових знань студентам – майбутнім фахівцям залізничної і будівельної галузей під час реалізації навчального процесу.

Результати досліджень апробовані на 9 науково-технічних конференціях у 2022–25 рр. та опубліковані у 7 наукових працях, у т.ч. 4 статтях у фахових виданнях України категорії Б, 3 статтях у виданнях, що індексуються НМБД Scopus, а також 2 описах до патентів на корисні моделі.

У **1 розділі** виконано аналіз літературних та нормативних джерел, матеріалів обстежень. Встановлено, що на залізницях загального користування України близько 77 % колій укладено на залізобетонних шпалах, яких експлуатується понад 57,9 млн. З цих шпал близько 254 тис. є непридатними через пошкодження (дефекти), спричинені механічними, електрокорозійними, корозійними впливами. Електричний опір залізобетонних шпал недостатній для ефективного запобігання втратам

тягового струму, струмам витоку, електрокорозії. Заміна сталеві арматури композитною дозволить підвищити електричний опір, проте заміна ускладнюється відміною композитної арматури від сталеві за пружними властивостями і, враховуючи особливості армування шпал, залишається недослідженою.

У розділі 2 наведено методи досліджень. Розроблено методику порівняльного дослідження напружено-деформованого стану (НДС) залізничних шпал із бетону з попередньо-напруженою сталеві дротяною та композитною арматурою під поїзними навантаженнями на моделях. Методика включає розроблення моделей, розрахунковий і натурний експерименти з їх навантаження, порівняння їх результатів для верифікації результатів розрахунків шпал. Розроблено оригінальну методику порівняльного дослідження впливу електричних потенціалів від струмів витоку з рейок та агресивних середовищ на шпали із бетону зі сталеві дротяною та композитною арматурою на моделях. Методика включає розробку моделей, їх експозицію під цими впливами та дослідження їх наслідків, у т.ч. новим методом наноіндентування, який дозволяє визначати мікромеханічні властивості цементного каменю, що залежать від ступеня його електроміграційного вилуговування.

Розділ 3 містить теоретичне обґрунтування створення та експлуатації шпал із бетону з композитною арматурою. Виконано дослідження впливу заміни сталеві арматури композитною на напружено-деформований стан під поїзними навантаженнями шпал та їх спрощених моделей, придатних для експериментальних досліджень. Розроблено схеми моделей та їх випробування, вихідні дані для розрахунку, виконано розрахунки напружено-деформованого стану шпал та їх моделей методом скінчених елементів. В результаті аналізу НДС шпал під поїзним навантаженням встановлено, що за однакового попереднього натягу арматурного пакету 353 кН максимальні напруження складають для шпал з композитною та сталеві дротяною арматурою: стискаючі – 16,1 і 16,7 МПа, розтягувальні – 1,1 і 0,12 МПа. Ці

напруження менші границі міцності бетону на стиск і розтяг, отже умови міцності та тріщиностійкості виконуються. Зниження попереднього напруження композитної арматури призводить до незначного збільшення максимальних стискаючих напружень, проте розтягувальні напруження збільшуються до 6–7 МПа, що перевищує границю міцності на розтяг та обумовлює роботу шпал з тріщинами.

Виконано також якісний та кількісний аналіз впливу заміни сталеві дротяної арматури композитною на електрофізичні та електрокорозійні властивості шпал.

Розділі 4 містить результати експериментальних досліджень моделей шпал із бетону з дротяною сталеві та стержновою базальтопластикові арматурі та порівняння отриманих даних з результатами теоретичних досліджень. Зокрема, виконано дослідження міцності, жорсткості та тріщиностійкості шпал випробуванням моделей. Для цього виготовлено фізичні моделі шпал із бетону з дротяною сталеві та стержновою базальтопластикові арматурі, виконано натурні експерименти з їх навантаження. Встановлено, що в процесі збільшення моменту від навантаження моделей спостерігаються такі послідовні стадії деформування: утворення в розтягнутій зоні поперечних тріщин; розвиток цих тріщин до пластичного шарніру; руйнування за рахунок проковзування арматури в бетоні. На зазначені моменти попередній натяг арматури впливає більше за виду застосовані арматури. Порівняльним аналізом результатів, отриманих розрахунком та експериментально на моделях, знайдено величини поправочних коефіцієнтів для визначення розрахунком моменту тріщиностійкості та руйнівного моменту шпал – відповідно, 2,24 і 0,9 для шпал зі сталеві дротяною арматурі і 2,39 і 0,98 для шпал з композитною арматурі.

Проведено дослідження електричного опору моделей, впливу електричних потенціалів на корозійні процеси, зокрема, досліджено зміну сили струму в моделях та їхнього електричного опору протягом експозиції,

здійснено оцінку нейтралізації цементного каменю в моделях, оцінку проникнення хлоридів у моделі, оцінку корозійного ураження арматури. Виконано дослідження наслідків електричного впливу на моделі методом наноіндентування та електронно-мікроскопічними дослідженнями. Розрахунком та експериментально встановлено, що за рахунок заміни сталеві дрітної арматури діелектричною композитною електричний опір шпал у суху та вологу погоду збільшується в 6–16 раз, отже, на порядок, а у дощову погоду – на декілька порядків, що забезпечить відповідне зменшення втрати тягових струмів та струмів витоку, підвищить надійність роботи сигнальних рейкових кіл. Експериментально встановлено, що у залізобетонних шпалах з випусками арматури із торців струм стікає з рейок і скріплень через поровий електроліт бетону (насичений розчин $Ca(OH)_2$) на арматуру, а з її випусків на торцях шпал – через баласт у земляне полотно, спричиняючи електрокорозію арматури на кінцях шпал. Відносно бетону арматура дренає струми і він не зазнає електрокорозії (електроміграційного вилуговування). У випадку заміни сталеві арматури діелектричною композитною струм стікає виключно через бетон. Така арматура не дренає і не розподіляє струм, створюючи умови для електрокорозії бетону, якій необхідно запобігти підвищенням його щільності, а, отже, й класу за міцністю. Встановлено також, що під впливом електричного потенціалу і струму інтенсифікується дифузія в бетон іонів, агресивних до сталеві арматури і нейтральних до композитної, отже, шпали з композитною арматурою не зазнаватимуть пошкоджень в умовах потрапляння розчинних речовин на електрифіковану колію.

У розділі 5 охарактеризовано впровадження результатів досліджень. Розроблено спосіб виробництва попередньо напружених шпал, на який подано заявки на видачу патентів на винахід і корисну модель, отримано патент на корисну модель. За результатами досліджень для одного з підприємств України розроблено рекомендації з вибору конструкції і технології виробництва залізобетонних шпал, які передбачають можливість

виробництва шпал з композитною арматурою. Рекомендації впроваджені, зокрема, розроблено конструкцію шпал, уведено в експлуатацію технологічну лінію з їх виробництва та поставлено шпали на виробництво. Впровадження забезпечило соціально-економічний ефект, а саме: створено 15 робочих місць, збільшено обсяг прибутку підприємства та, відповідно, збільшено обсяги надходження до бюджетів різних рівнів обов'язкових та податкових платежів. Результати дисертаційного дослідження впроваджено у навчальний процес за всіма рівнями освіти за спеціальностями 273 (J7) Залізничний транспорт і 192 (G19) Будівництво та цивільна інженерія.

У загальних висновках констатовано виконання завдань ы досягнення досягнення мети досліджень, після списку використаних джерел наведено додатки.

Ключові слова: залізничний транспорт, залізниця, рейкова колія, бетонна шпала, композитна арматура, бетон, модель, балка, метод скінченних елементів, чисельний аналіз, напружено-деформований стан, електричний опір, струм витоку, електрокорозія, дефекти.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Статті у фахових виданнях та у виданнях, що включені до наукометричних баз:

1. Plugin A., Murygin M., Plugin D., Najafov E., Musiienko S., Lobiak O. Establishing patterns in the stressed-strained state of concrete sleepers with prestressed composite reinforcement and their models. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies* 5 (7) (137) (2025). P. 6–16. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.341427>

2. Плугін А.А., Муригін М.А., Мусієнко С.М., Редько І.О., Геворкян Е.С. Порівняльні дослідження впливу електричних потенціалів на корозійні процеси в залізничних шпалах із бетону зі сталевую та композитною арматурою *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту* 213 (2025). С. 61–82. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.213.2025.341989>

3. Плугін О.А., Плугін А.А., Геворкян Е.С., Муригін М.А. Механізм і кінетика електрокорозії рейкової сталі та ресурс рейок у залізничних тунелях *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту* 212 (2025). С. 114–132. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.212.2025.336481>

4. Plugin A., Murygina N., Pluhin O., Murygin M., Musienko S. Physical-mechanical properties of composite material based on polyester fibres and mineral binder *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 1499 (2025) 012074. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1499/1/012074>

5. 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>

6. Плугін А.А., Муригін М.А., Крикун О.П., Наджафов Е.Ф., Зінченко В.В. Експериментальні дослідження впливу електричних потенціалів на корозійні процеси в залізобетонних шпалах *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту* 207 (2024). С. 38–51. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.207.2024.301944>

7. 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). С. 82–101. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.206.2023.296619>

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

8. Мусієнко С.М., Куцин К.О., Муригін М.А., Плугін А.А. Щодо впливу тріщиностійкості залізобетонних шпал на роботу контактної мережі та систем СЦБ *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті 3* (Додаток. Тези стендових доповідей та виступів учасників конференції) (2025). С. 51–52. https://kart.edu.ua/wp-content/uploads/2025/09/dodatok-do-zhurnalu-ikszt-3-2025-z-tezami-dopovidej_38-mnpk.pdf

9. Муригін М.А., Наджафов Е.Ф., Плугін А.А., Плугін Д.А., Лобяк О.В. Дослідження моделей попередньо напружених конструкцій із бетону зі сталевую та композитною арматурою *Збірник тез міжнародної науково-технічної конференції «Структуроутворення та руйнування композиційних будівельних матеріалів та конструкцій»* Одеса (22–23.04.2025). С. 50–53.

10. Плугін А.А., Панченко С.В., Муригін М.А., Плугін Д.А., Наджафов Е.Ф., Лобяк О.В. Порівняльні дослідження моделей бетонних конструкцій, армованих попередньо напруженою сталевую та композитною арматурою *Тези доповідей 10 Міжнародної конференції «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд і будівель на залізничному транспорті»* (ТрансБуд-2024) Харків (20–22.11.2024). С. 45–48. <https://kart.edu.ua/wp-content/uploads/2024/09/tezi-transbud-2024-2.pdf>

11. 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 Міжнародної конференції «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд і будівель на залізничному транспорті» (ТрансБуд-2024)* Харків (20–22.11.2024). С. 52–55. <https://kart.edu.ua/wp-content/uploads/2024/09/tezi-transbud-2024-2.pdf>

12. 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 міжнародної науково-технічної конференції «Структуроутворення та руйнування композиційних будівельних матеріалів та конструкцій»* Одеса (23.04.2024) С. 111–114. https://drive.google.com/file/d/1jI7vWluCtPrF4HO4P4BpNs_at6XPvwR/view

13. Муригін М.А., Плугін А.А., Плугін Д.А., Люб'як О.В. Залізничні шпали з бетону, армованого композитною арматурою *Збірник тез міжнародної науково-технічної конференції «Структуроутворення та руйнування композиційних будівельних матеріалів та конструкцій»* Одеса (23.04.2024). С. 92–95. https://drive.google.com/file/d/1jI7vWluCtPrF4HO4P4BpNs_at6XPvwR/view

14. Плугін А.А., Zhu W., Муригін М.А., Плугін Д.А., Муригіна Н.О. Нові методи досліджень електрокорозійних процесів у конструкціях із бетону II Всеукраїнська науково-практична конференція «BIM-технології в будівництві: Досвід та інновації». Харків (15–16.12.2023). С. 94–95. https://dmg.kname.edu.ua/images/other/Tezi_BIM_2023.pdf

15. 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 / За ред. Ю.С. Пройдака, Р.В. Маркуля. *Матеріали 82 Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного*

транспорту» Дніпро (20–21.04.2023). С. 364–366.

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

16. Пługін А.А., Калюжна О.В., Муригін М.А., Наджафов Е.Ф., Пługін Д.А. Перспективи застосування композитної арматури в шпалах із бетону Міжнародна науково-технічна конференція «Органічні і мінеральні в'язучі та дорожні бетони на їх основі» Харків (08–09.11.2022). С. 107–113.

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

Публікації, що додатково відображають матеріали дисертації:

17. Пат. на кор. модель 159801 UA МПК E01B 3/34 (2006/01) E04G 21/12 (2006.01) Спосіб виготовлення шпал із бетону з попередньо напруженою арматурою. МПК E01B 3/34, E04G 21/12. УкрДУЗТ. Пługін А.А., Пługін Д.А., Муригін М.А., Панченко С.В., Трикоз Л.В., Чжи В, (Zhu W.), Лобяк О.В., Муригін А.В., Пługін О.А., Калюжна О.В., Муригіна Н.О., Дудін О.А., Наджафов Е.Ф. Заявл. 18.12.2023, заявка № u202306182, опубл. 09.07.2025, бюл. № 28.

18. 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. 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. Заявл. 28.08.2023, заявка № u 2023 04061, опубл. 17.01.2024, бюл. №3/2024.

19. Спосіб виготовлення шпал із бетону з попередньо напруженою арматурою. МПК E01B 3/34, E04G 21/12. УкрДУЗТ. Пługін А.А., Пługін Д.А., Муригін М.А., Панченко С.В., Трикоз Л.В., Чжи В, (Zhu W.), Лобяк О.В., Муригін А.В., Пługін О.А., Калюжна О.В., Муригіна Н.О., Дудін О.А., Наджафов Е.Ф. Заявка на видачу патенту на винахід № а 2023 06180. Заявл. 18.12.2023.

20. 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. Плугін, W. Zhu, О.А. Плугін, О.А. Дудін, М.А. Муригін, С.М. Мусяєнко. Заявка на видачу патенту на винахід № а 2023 04060. Заявл. 28.08.2023.

ABSTRACT

Maksim Murygin. Railway sleepers made of concrete with composite reinforcement. Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Dissertation of Doctor of Philosophy degree in Specialty 273 Railway Transport (27 Transport). Ukrainian State University of Railway Transport of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2026.

The dissertation was performed at the Department of Railway Track and Transport Structures of the Ukrainian State University of Railway Transport and consists of an introduction, five chapters, general conclusions, a list of 120 sources, and 6 appendices.

In the **introduction**, the general characteristic of the work is provided; in particular, the relevance of the chosen topic is proven, its connection with scientific programs and plans is shown, the purpose, object and subject, working hypothesis, and research tasks are formulated, the provisions of scientific novelty are set out, the validity and practical significance of the obtained results are substantiated, and data on their approbation are provided.

At the present time, various constructions of under-rail supports made of various materials are used on the railways of the world. Since the operating conditions of railways are constantly changing – movement speeds, axial loads, and traffic density are increasing – the regulatory requirements for the constructions of under-rail supports and materials for their manufacture are also changing.

From the XIX to the middle of the XX century, wooden sleepers were practically the only mass under-rail support. However, in connection with the obvious disadvantages of wood for operation in conditions of variable humidity –

large moisture deformations, low bio-resistance – from the second half of the XX century, they have been actively displaced by pre-stressed reinforced concrete sleepers.

However, reinforced concrete sleepers also have a number of disadvantages, mainly caused by the corrosion vulnerability of the reinforcement and concrete. Already in the XXI century, composite sleepers appear, which are deprived of many disadvantages of wooden and reinforced concrete sleepers; composite reinforcement for reinforcing concrete is becoming increasingly widespread, which has a number of advantages over steel reinforcement.

However, they do not yet find wide application, and wooden and reinforced concrete sleepers are still the most mass-produced. Many disadvantages can be eliminated in concrete sleepers reinforced with composite reinforcement. Among their advantages, one can note the protection of the polymer by concrete from ultraviolet radiation, and the high corrosion resistance of the reinforcement.

Replacing steel reinforcement with corrosion-resistant composite reinforcement will allow reducing the requirements for the crack resistance of sleepers and reducing the pre-tension force or abandoning it. This will allow optimizing the requirements for the early strength of concrete, reducing the damageability of sleepers during operation due to the reduction of tensile stresses in the transverse direction.

Based on the above, the creation of theoretical and experimental foundations for the production and operation of railway sleepers made of concrete with improved electrical properties and electro-corrosion resistance through the use of composite reinforcement, the development on their basis of the construction, production technology, and instructions for the operation of concrete sleepers reinforced with composite reinforcement, is an urgent task.

The relevance is emphasized by the performance of research within the framework of state-budget scientific research works of the Ministry of Education and Science of Ukraine.

The purpose of the research is to create theoretical and experimental foundations for the production and operation of railway sleepers made of concrete with improved electrical properties and electro-corrosion resistance through the use of composite reinforcement.

Object of research – stress-strain state, electrical properties, electro-corrosion processes and their consequences in railway sleepers made of concrete with composite and steel wire reinforcement.

Subject of research – railway sleepers made of concrete with composite and steel wire reinforcement and their models.

Working hypothesis – the replacement of steel wire reinforcement with composite [reinforcement] in pre-stressed concrete sleepers will allow increasing electrical resistance, reducing the loss of traction currents and leakage currents, and preventing electro-corrosion and corrosion processes.

Research tasks:

- to perform an analytical review of sources regarding operating conditions and damageability of reinforced concrete sleepers, as well as the possibility of replacing steel wire reinforcement with composite [reinforcement];

- to develop a methodology for the study and comparative analysis of the stress-strain state of concrete sleepers with pre-stressed steel and composite reinforcement on models;

- to develop methods for comparative research of the electrical properties of concrete sleepers with steel and composite reinforcement, the influence of constant and pulsating unidirectional electric potentials and aggressive environments on them using models;

- to perform numerical and full-scale experiments with the loading of models of concrete sleepers with pre-stressed composite and steel wire reinforcement, as well as a comparative analysis of the results of numerical and full-scale experiments;

- to investigate the electrical properties of concrete sleeper models with composite and steel wire reinforcement, to perform an experiment with their

exposure to constant and pulsating unidirectional electric potentials and aggressive environments, to investigate the consequences of these effects and to perform their comparative analysis;

– to develop recommendations regarding the construction and manufacturing technology of concrete sleepers with composite and steel reinforcement.

As a result of the research, new scientific results were obtained; in particular, the ideas about the performance and stress-strain state under train load of concrete sleepers with steel wire and composite basalt-plastic reinforcement, in which the entire reinforcement package is pre-stressed, have been further developed.

In particular, for the first time, the dependencies of the maximum stress values in the concrete of sleepers with composite reinforcement under train load on the tension force of the reinforcement package, [and] deformation diagrams of models of such sleepers with different pre-tension forces of the reinforcement package were obtained.

Ideas about the electrical properties, corrosion and electro-corrosion behavior of concrete sleepers with composite basalt-plastic reinforcement have been further developed. In particular, it was established for the first time that the replacement of steel wire reinforcement with composite [reinforcement] causes an increase in the electrical resistance of the sleeper by 6–16 times, but leads to electromigration leaching of the concrete under the influence of leakage currents, for the prevention of which it is advisable to increase the density and, therefore, the class of the concrete.

The practical significance of the obtained results lies in the creation of theoretical and experimental foundations for the design, production, and operation of concrete sleepers with composite reinforcement, which will have better operational qualities compared to sleepers with steel wire reinforcement, as well as in providing relevant knowledge to future specialists in the field through implementation into the educational process.

The research results have been approved at 9 scientific and technical conferences in 2022–25 and published in 7 scientific works, including 4 articles in

specialized publications of Ukraine of category B, 3 articles in publications indexed by the Scopus database, as well as 2 descriptions for patents for utility models.

In **Chapter 1**, an analysis of literary and regulatory sources, [and] survey materials was performed. It was established that on the public railways of Ukraine, about 77% of tracks are laid on reinforced concrete sleepers, of which more than 57.9 million are in operation. Of these sleepers, about 254 thousand are unsuitable due to damage (defects) caused by mechanical, electro-corrosive, [and] corrosive influences. The electrical resistance of reinforced concrete sleepers is insufficient for the effective prevention of traction current losses, leakage currents, and electro-corrosion. Replacing steel reinforcement with composite [reinforcement] will allow increasing the electrical resistance, however, the replacement is complicated by the difference of composite reinforcement from steel in elastic properties and, taking into account the specifics of sleeper reinforcement, remains unstudied.

In **Chapter 2**, the research methods are presented. A methodology for a comparative study of the stress-strain state (SSS) of railway sleepers made of concrete with pre-stressed steel wire and composite reinforcement under train loads on models was developed. The methodology includes the development of models, numerical and full-scale experiments of their loading, [and] comparison of their results for verification of the sleeper calculation results. An original methodology for a comparative study of the influence of electrical potentials from leakage currents from rails and aggressive media on concrete sleepers with steel wire and composite reinforcement on models was developed. The methodology includes the development of models, their exposure under these influences, and the study of their consequences, including [by] the new method of nanoindentation, which allows determining the micromechanical properties of cement paste that depend on the degree of its electromigration leaching.

Chapter 3 contains the theoretical substantiation of the creation and operation of concrete sleepers with composite reinforcement. A study was performed on the influence of replacing steel reinforcement with composite [reinforcement] on the

stress-strain state under train loads of sleepers and their simplified models suitable for experimental research. Schemes of models and their testing, initial data for calculation were developed; calculations of the stress-strain state of sleepers and their models were performed by the finite element method (FEM).

As a result of the analysis of the SSS of sleepers under train load, it was established that with the same pre-tension of the reinforcement package of 353 kN, the maximum stresses for sleepers with composite and steel wire reinforcement are: compressive – 16.1 and 16.7 MPa, tensile – 1.1 and 0.12 MPa. These stresses are less than the ultimate strength of concrete in compression and tension; therefore, the conditions of strength and crack resistance are fulfilled. A decrease in the pre-stressing of composite reinforcement leads to a slight increase in maximum compressive stresses, but tensile stresses increase to 6–7 MPa, which exceeds the tensile strength limit and causes the operation of sleepers with cracks.

A qualitative and quantitative analysis of the influence of replacing steel wire reinforcement with composite [reinforcement] on the electrophysical and electro-corrosive properties of sleepers was also performed.

Chapter 4 presents the results of experimental studies of models of concrete sleepers with steel wire and composite reinforcement and a comparison of their results with the results of theoretical studies. In particular, a study of the strength, rigidity, and crack resistance of sleepers by testing models was performed. For this purpose, physical models of concrete sleepers with steel wire and composite reinforcement were manufactured, and full-scale experiments with their loading were performed. It was established that as the models are loaded and the moment from it increases, deformation develops in stages: formation of cracks in the tension zone; their development into a plastic hinge; destruction due to the slipping of reinforcement in the concrete.

On the mentioned moments, the type of reinforcement had a lesser influence than the pre-tension force of the reinforcement. By comparative analysis of the results obtained by calculation and experimentally on models, the values of correction factors for determining the crack resistance moment and the destructive

moment of sleepers by calculation were found – 2.24 and 0.9 for sleepers with steel wire reinforcement and 2.39 and 0.98 for sleepers with composite reinforcement, respectively.

Research on the electrical resistance of the models and the influence of electrical potentials on corrosion processes was conducted; in particular, the change in current strength in the models and their electrical resistance during exposure were studied, an assessment of the neutralization of the cement paste in the models was carried out, an assessment of chloride penetration into the models, and an assessment of the corrosive damage to the reinforcement. A study of the consequences of electrical influence on the models was performed by the method of nanoindentation and electron microscopic studies.

It was established by calculation and experimentally that due to the replacement of steel wire reinforcement with dielectric composite [reinforcement], the electrical resistance of sleepers in dry and wet weather increases by 6–16 times, thus, by an order of magnitude, and in rainy weather – by several orders of magnitude, which will ensure a corresponding reduction in the loss of traction currents and leakage currents, increasing the reliability of signaling rail circuits. It was experimentally established that in reinforced concrete sleepers with reinforcement outlets from the ends, current flows from the rails and fastenings through the pore electrolyte of the concrete (saturated $\text{Ca}(\text{OH})_2$ solution) to the reinforcement, and from its outlets at the ends of the sleepers – through the ballast into the subgrade, causing electro-corrosion of the reinforcement at the sleeper ends.

Relative to the concrete, the reinforcement drains currents, and it [the concrete] does not undergo electro-corrosion (electromigration leaching). In the case of replacing steel reinforcement with dielectric composite [reinforcement], the current flows exclusively through the concrete. Such reinforcement does not drain or distribute the current, creating conditions for the electro-corrosion of the concrete, which must be prevented by increasing its density and, therefore, its strength class. It was also established that under the influence of electrical potential

and current, the diffusion of ions into the concrete – aggressive to steel reinforcement and neutral to composite – is intensified; therefore, sleepers with composite reinforcement will not suffer damage in conditions where soluble substances fall onto the electrified track.

Chapter 5 contains information on the implementation of the research results. A method for manufacturing concrete sleepers with pre-stressed reinforcement was developed and patented. Based on the research results, recommendations for the choice of construction and production technology of reinforced concrete sleepers, which provide for the possibility of producing sleepers with composite reinforcement, were developed for one of the enterprises of Ukraine. The recommendations have been implemented; in particular, the construction of sleepers was developed, a technological line for their production was put into operation, and the sleepers were put into production.

The implementation provided a socio-economic effect, namely: 15 jobs were created, the volume of the enterprise's profit was increased, and, accordingly, the volumes of mandatory and tax payments to the budgets of various levels were increased. The results of the dissertation research have been implemented into the educational process for the preparation of bachelors, masters, and doctors of philosophy in specialties 273 Railway Transport and 192 Construction and Civil Engineering.

In the general conclusions, the fulfillment of research tasks is summarized and the achievement of the goal is stated, and additional materials are provided in the appendices.

Keywords: railway transport, railway, rail track, concrete sleeper, composite reinforcement, concrete, model, beam, finite element method, numerical analysis, stress-strain state, electrical resistance, leakage current, electrocorrosion, defects.

LIST OF PUBLICATIONS OF THE ACQUIRER

Articles in professional publications and in publications included in scientometric databases:

1. Plugin A., Murygin M., Plugin D., Najafov E., Musiienko S., Lobiak O. Establishing patterns in the stressed-strained state of concrete sleepers with prestressed composite reinforcement and their models. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies* 5 (7) (137) (2025). P. 6–16. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.341427>

2. Plugin A.A., Murygin M.A., Musiienko S.M., Redko I.O., Gevorkyan E.S. Comparative studies of the influence of electric potentials on corrosion processes in railway sleepers made of concrete with steel and composite reinforcement *Collection of scientific papers of the Ukrainian State University of Railway Transport* 213 (2025). P. 61–82. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.213.2025.341989>

3. Plugin O.A., Plugin A.A., Gevorkyan E.S., Murygin M.A. Mechanism and kinetics of electrocorrosion of rail steel and rail service life in railway tunnels *Collection of scientific works of the Ukrainian State University of Railway Transport* 212 (2025). P. 114–132. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.212.2025.336481>

4. Plugin A., Murygina N., Pluhin O., Murygin M., Musienko S. Physical-mechanical properties of composite material based on polyester fibres and mineral binder *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 1499 (2025) 012074. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1499/1/012074>

5. 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>

6. Plugin A.A., Murygin M.A., Krykun O.P., Nadzhafov E.F., Zinchenko V.V. Experimental studies of the influence of electric potentials on corrosion processes in reinforced concrete sleepers *Collection of scientific works of the*

Ukrainian State University of Railway Transport 207 (2024). P. 38–51.
<https://doi.org/10.18664/1994-7852.207.2024.301944>

7. Plugin A.A., Murygina N.O., Malyshevska A.S., Plugin D.A., Murygin M.A. Development and research of composite material for the ballastless bridge pavement layer Collection of scientific papers of the Ukrainian State University of Railway Transport 206 (2023). P. 82–101. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.206.2023.296619>

Scientific papers that confirm the approval of the dissertation materials:

8. Musienko S.M., Kutsyn K.O., Murygin M.A., Plugin A.A. On the influence of crack resistance of reinforced concrete sleepers on the operation of the contact network and SCB systems Information and control systems in railway transport 3 (Appendix. Abstracts of poster presentations and speeches of conference participants) (2025). P. 51–52. https://kart.edu.ua/wp-content/uploads/2025/09/dodatok-do-zhurnalu-ikszt-3-2025-z-tezami-dopovidej_38-mnpk.pdf

9. Murygin M.A., Nadzhafov E.F., Plugin A.A., Plugin D.A., Lobyak O.V. Research on models of prestressed concrete structures with steel and composite reinforcement Collection of abstracts of the international scientific and technical conference "Structure formation and destruction of composite building materials and structures" Odesa (22–23.04.2025). P. 50–53.

10. Plugin A.A., Panchenko S.V., Murygin M.A., Plugin D.A., Nadzhafov E.F., Lobyak O.V. Comparative studies of models of concrete structures reinforced with prestressed steel and composite reinforcement Abstracts of the 10th International Conference "Problems of Reliability and Durability of Engineering Structures and Buildings on Railway Transport" (TransBud-2024) Kharkiv (20–22.11.2024). P. 45–48. <https://kart.edu.ua/wp-content/uploads/2024/09/tezi-transbud-2024-2.pdf>

11. Plugin A.A., Tuley Yu.L., Murygina N.O., Plugin O.A., Murygina M.A., Musienko S.M. New composite material for reinforced concrete ballastless bridge

decks of railway bridges Abstracts of the 10th International Conference “Problems of Reliability and Durability of Engineering Structures and Buildings on Railway Transport” (TransBud-2024) Kharkiv (20–22.11.2024). P. 52–55.

<https://kart.edu.ua/wp-content/uploads/2024/09/tezi-transbud-2024-2.pdf>

12. Plugin A.A., Murygina N.O., Plugin D.A., Murygin A.V., Malyshevskaya A.S. Dispersed polyester fiber reinforced cement composites for the underlayment between reinforced concrete bridge deck and metal beams of railway bridges Collection of abstracts of the international scientific and technical conference "Structure formation and destruction of composite building materials and structures" Odesa (04/23/2024). P. 111–114.

https://drive.google.com/file/d/1jI7vWluCtPrF4HO4P4BpNs-_at6XPvwR/view

13. Murygin M.A., Plugin A.A., Plugin D.A., Lobyak O.V. Railway sleepers made of concrete reinforced with composite reinforcement Collection of abstracts of the international scientific and technical conference "Structure formation and destruction of composite building materials and structures" Odesa (04/23/2024). P. 92–95.

https://drive.google.com/file/d/1jI7vWluCtPrF4HO4P4BpNs-_at6XPvwR/view

14. Plugin A.A., Zhu W., Murygin M.A., Plugin D.A., Murygina N.O. New methods for studying electrocorrosion processes in concrete structures II All-Ukrainian scientific and practical conference "BIM technologies in construction: Experience and innovations". Kharkiv (15–16.12.2023). P. 94–95.

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

15. Plugin A.A., Murygina N.O., Malyshevskaya A.S., Murygin M.A., Manko N.S. Materials for connecting railway reinforced concrete bridge decks with steel bridge structures / Edited by Yu.S.Proydak, R.V.Markul. Materials of the 82nd International Scientific and Practical Conference "Problems and Prospects for the Development of Railway Transport" Dnipro (20–21.04.2023) P. 364–366. <http://eadnurt.diit.edu.ua/jspui/handle/123456789/16951>

16. Plugin A.A., Kalyuzhna O.V., Murygin M.A., Nadzhafov E.F., Plugin D.A. Prospects for the use of composite reinforcement in concrete sleepers

International scientific and technical conference "Organic and mineral binders and road concretes based on them" Kharkiv (08–09.11.2022). P. 107–113.
https://rcf.khadi.kharkov.ua/fileadmin/user_upload/Збирник_тез_-_Редакція_.pdf

Publications that additionally reflect the materials of the dissertation:

17. Pat. on cor. model 159801 UA MPK E01B3/34 (2006/01) E04G 21/12 (2006.01) Method of manufacturing sleepers from concrete with prestressed reinforcement. MPK E01B 3/34, E04G 21/12. UkrDUZT. Plugin A.A., Plugin D.A., Murygin M.A., Panchenko S.V., Trykoz L.V., Zhi V, (Zhu W.), Lobyak O.V., Murygin A.V., Plugin O.A., Kalyuzhna O.V., Murygina N.O., Dudin O.A., Nadzhafov E.F.o. Application. 18.12.2023, application № u202306182, publ. 09.07.2025, bulletin № 28.

18. Pat. on cor. model 155132 UA MPK E04V 5/10 (2006.01) Method for repairing ballastless bridge decks of railway bridges made of reinforced concrete slabs. UkrDUZT. 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. Appl. 08/28/2023, application № u 2023 04061, published on 01/17/2024, bulletin № 3/2024.

19. Method for manufacturing sleepers from concrete with prestressed reinforcement. MPK E01B 3/34, E04G 21/12. UkrDUZT. Plugin A.A., Plugin D.A., Murygin M.A., Panchenko S.V., Trykoz L.V., Zhi V, (Zhu W.), Lobyak O.V., Murygin A.V., Plugin O.A., Kalyuzhna O.V., Murygina N.O., Dudin O.A., Nadzhafov E.F. Application for a patent for an invention № a 2023 06180. Application 18.12.2023.

20. Method for repairing ballastless bridge decks of railway bridges made of reinforced concrete slabs. UkrDUZT. A.A. Plugin, N.O. Murygina, A.V. Murygina, S.V. Panchenko, D.A. Plugin, W. Zhy, O.A. Plugin, O.A. Dudin, M.A. Murygina, S.M. Musienko. Application for the grant of a patent for an invention № a 2023 04060. Application. 08.28.2023.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	30
РОЗДІЛ 1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ І НОРМАТИВНИХ ДЖЕРЕЛ З ОСОБЛИВОСТЕЙ КОНСТРУКЦІ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЇ ПІДРЕЙКОВИХ ОСНОВ.....	35
1.1 Конструкції підрейкових основ залізниць	35
1.2 Особливості конструкції і технології виготовлення залізобетонних шпал.....	39
1.3 Аналіз стану шпального господарства залізниць України.....	45
1.4 Аналіз пошкоджень шпал.....	53
1.5 Участь залізобетонних шпал в електричних колах та електрокорозійних процесах.....	57
1.6 Залізничні шпали з альтернативних матеріалів.....	61
1.7 Конструкції із бетону з композитною арматурою.....	63
1.8 Залізничні шпали із бетону з композитною арматурою.....	66
1.9 Робоча гіпотеза та завдання досліджень.....	66
Висновки за розділом 1.....	67
РОЗДІЛ 2 РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	70
2.1 Методи порівняльного дослідження напружено-деформованого стану шпал із бетону з попередньо-напруженою сталевною дротяною та композитною арматурою на моделях.....	70
2.1.1 Моделі шпал і схема їхнього навантаження.....	70
2.1.2 Дослідження фізико-механічних властивостей арматури.....	75
2.1.3 Визначення зчеплення арматури з бетоном.....	81
2.1.4 Виготовлення моделей.....	85
2.1.5 Дослідження електричного опору моделей.....	102
2.1.6 Розрахунковий експеримент з навантаження моделей.....	104
2.1.7 Натурний експеримент з навантаження моделей.....	104
2.2 Методи досліджень агресивних, у т.ч. електричних впливів на	

корозійні процеси в шпалах зі сталевую та композитною арматурою.....	105
2.2.1 Моделювання агресивних, у т.ч. електричних впливів на шпали із бетону.....	105
2.2.2 Прилади та обладнання.....	109
2.2.3 Виготовлення зразків-моделей.....	113
2.2.4 Створення агресивних, у т.ч. електричних впливів на моделі.....	115
2.2.5 Дослідження наслідків агресивних, у т.ч. електричних впливів.....	116
2.2.6 Дослідження наслідків агресивних, у т.ч. електричних впливів методом наноіндентування.....	118
2.2.7 Електронно-мікроскопічні дослідження наслідків агресивних, у т.ч. електричних впливів.....	122
Висновки за розділом 2.....	123
РОЗДІЛ 3 ТЕОРЕТИЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ШПАЛ ІЗ БЕТОНУ З КОМПОЗИТНОЮ АРМАТУРОЮ.....	125
3.1 Дослідження впливу заміни сталеві арматури композитною на напружено-деформований стан шпал (розрахункові експерименти методом скінчених елементів)	125
3.2 Дослідження впливу заміни сталеві арматури композитною на напружено-деформований стан шпал на моделях.....	135
3.2.1 Схема моделей та їх випробування.....	135
3.2.2 Вихідні дані для розрахунку моделей.....	135
3.2.3 Розрахунки напружено-деформованого стану моделей.....	136
3.3 Аналіз впливу заміни сталеві дротяної арматури композитною на електрофізичні та електрокорозійні властивості шпал.....	150
3.3.1 Якісний аналіз впливу заміни сталеві дротяної арматури композитною на електрофізичні та електрокорозійні властивості шпал....	150
3.3.2 Кількісний аналіз впливу заміни сталеві дротяної арматури композитною на електрофізичні властивості шпал.....	153
Висновки за розділом 3.....	165

РОЗДІЛ 4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ МОДЕЛЕЙ ШПАЛ ІЗ БЕТОНУ ЗІ СТАЛЕВОЮ ДРОТЯНОЮ ТА КОМПОЗИТНОЮ АРМАТУРОЮ.....	168
4.1 Дослідження міцності, жорсткості та тріщиностійкості шпал на моделях.....	168
4.2 Дослідження впливу електричних потенціалів на корозійні процеси... 177	177
4.2.1 Електричний опір моделей.....	177
4.2.2 Зміна сили струму в моделях та їхнього електричного опору протягом експозиції.....	179
4.2.3 Оцінка нейтралізації цементного каменю в моделях.....	182
4.2.4 Оцінка проникнення хлоридів у моделі.....	183
4.2.5 Оцінка корозійного ураження арматури.....	183
4.2.6 Оцінка корозійного ураження арматури та бетону методом наноіндентування.....	186
4.2.7 Електронно-мікроскопічні дослідження наслідків електричного впливу на моделі.....	190
4.2.8 Загальна оцінка наслідків агресивних, у т.ч. електричних впливів на моделі.....	192
Висновки за розділом 4.....	196
РОЗДІЛ 5 ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	198
5.1 Розроблення способу виготовлення шпал із бетону з композитною арматурою.....	198
5.2 Розроблення рекомендацій з вибору технології виробництва шпал із бетону зі сталевую та композитною арматурою	209
5.2.1 Нормативні вимоги до шпал.....	210
5.2.2 Тип шпал.....	210
5.2.3 Конструкція шпал і технічні вимоги до них.....	210
5.2.4 Технологія виробництва шпал.....	211
5.2.5 Впровадження рекомендацій.....	212

5.3 Розробка способу ремонту верхньої будови колії на мостах.....	212
5.4 Оцінка соціально-економічної ефективності.....	212
5.5 Використання результатів досліджень у навчальному процесі.....	213
Висновки за розділом 5.....	213
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	215
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	218
ДОДАТКИ.....	233
ДОДАТОК А Кількість і стан шпал, що лежать у колії в Харківській дистанції колії за станом на 01.11.2025.....	234
ДОДАТОК Б Результати вимірювань електричного опору моделей.....	239
ДОДАТОК В Патенти на корисну модель та заявки на видачу патентів на винахід.....	241
ДОДАТОК Г Рекомендації з вибору конструкції і технології виробництва залізобетонних шпал.....	245
ДОДАТОК Д Протокол випробувань шпал залізобетонних попередньо- напружених з анкерованою стержневою арматурою Ш9.2.....	250
ДОДАТОК Е Акти впровадження результатів досліджень.....	254

ВСТУП

На залізницях світу основними типами підрейкових основ є залізобетонні та дерев'яні шпали, з яких залізобетонних – 60–65%. Залізобетонні шпали порівняно з дерев'яними не зазнають біопошкоджень та в меншому ступені зношуються в підрейковій площадці, отже, мають більший ресурс (довговічність). Через значні динамічні навантаження для них висувуються високі вимоги до міцності та тріщиностійкості, тому їх виробляють із бетону високих класів за міцністю зі сталевую стержневою або дротяною попередньо напруженою арматурою. Вони добре опираються механічним, у тому числі динамічним навантаженням, але мають невисокий електричний опір, що сприяє втратам тягового струму, утворенню струмів витоку та блукаючих струмів на електрифікованих ділянках, порушенням систем автоблокування. Залізобетонні шпали більш надійно забезпечують стабільність колії через більшу масу та міцність утримання деталей рейкових скріплень, тому саме вони переважні для безстикової колії, для дільниць з більшою вантажонапруженістю та швидкістю руху. Але у залізобетонних шпал є й низка недоліків. Їх більша маса вимагає більш потужних засобів механізації та енергоресурсовитрат на укладання та утримання колії. Шпали електропровідні, що у вологу погоду, особливо у разі зносу деталей ізоляції та наявності мікротріщин в бетоні призводить до збільшення втрат тягового струму на ділянках, електрифікованих як перемінним, так і постійним струмом. Впливає на шляхи протікання струмів і наявність випусків арматури на торцях шпал, обумовлених технологією їх виготовлення. Постійні струми витоку обумовлюють електрокорозійні процеси в металевих деталях, арматурі та навіть бетоні шпал і розташованих на шляху струмів витоку металевих і залізобетонних конструкцій. Струми витоку та блукаючі струми мають потужний електрокорозійний вплив на лінійні та інші споруди інфраструктури залізниць.

В теперішній час все більше конструкцій із бетону армують композитною арматурою, яка виготовляється із базальтових або скляних волокон, склеєних епоксидною смолою. Припущено, що заміна у бетонних шпалах сталевий арматури композитною: підвищить їх електричний опір; знизить струми витоку (зокрема втрати тягового струму); усуне корозійні процеси, пов'язані з протіканням електричного струму і впливом агресивних середовищ; дозволить пом'якшити вимоги до тріщиностійкості шпал та знизити зусилля попереднього напруження арматури. Проте фактична поведінка шпал з композитною арматурою під поїзними навантаженнями та електричними впливами залишалась майже недослідженою. Тому порівняльні дослідження таких впливів на шпали зі сталевий та композитною арматурою є актуальними і сприятиме впровадженню шпал з композитною арматурою, позбавлених недоліків залізобетонних шпал.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана на кафедрі залізничної колії і транспортних споруд Українського державного університету залізничного транспорту у складі грантової науково-дослідної роботи у рамках UUK і UK-Ukraine R&I twinning grant, Project #11150 «Integrated rail freight optimisation in Ukraine: Railway sleepers, rolling stock and logistics» (2023-24, ДРН№ 0123U102700), зокрема її робочого пакету III «Залізничні шпали», а також держбюджетних науково-дослідних робіт МОН України: «Теоретичні та експериментальні основи створення композиційних матеріалів на основі мінеральних в'яжучих для захисту від електрокорозії і ремонту споруд залізничного транспорту» (2022–2023, ДРН№ 0122U002125), «Теоретичні та експериментальні основи створення стійких до електричних і динамічних впливів бетонних виробів з композитною арматурою для будівництва та відновлення електрифікованих ділянок залізниць» » (2026, ДРН№0126U002127).

Мета роботи – створення теоретичних та експериментальних основ виробництва та експлуатації залізничних шпал із бетону з покращеними

електричним властивостями та електрокорозійною стійкістю за рахунок застосування композитної арматури.

Об'єкт досліджень – напружено-деформований стан, електричні властивості, електрокорозійні процеси та їхні наслідки у залізничних шпалах із бетону з композитною та сталеву дротяною арматурою.

Предмет досліджень – залізничні шпали із бетону зі сталеву дротяною та композитною арматурою та колія на них.

Робоча гіпотеза – заміна в попередньо напружених шпалах із бетону сталеву дротяною арматури композитною дозволить підвищити електричний опір, знизити втрату тягових струмів і струмів витоку, запобігти електрокорозійним та корозійним процесам.

Завдання досліджень:

- виконати аналітичний огляд джерел щодо умов експлуатації та пошкоджуваності залізобетонних шпал, а також можливості заміни сталеву дротяною арматури композитною;

- розробити методика дослідження і порівняльного аналізу напружено-деформованого стану шпал із бетону з попередньо напруженою сталеву та композитною арматурою на моделях;

- розробити методики порівняльного дослідження електричних властивостей шпал із бетону зі сталеву та композитною арматурою, впливу на них постійного та пульсуючого однонаправленого електричних потенціалів та агресивних середовищ на моделях;

- виконати розрахунковий і натурний експерименти з навантаженням моделей шпал із бетону з попередньо напруженою композитною та сталеву дротяною арматурою, а також порівняльний аналіз результатів розрахункового та натурального експериментів;

- дослідити електричні властивості моделей шпал із бетону з композитною та сталеву дротяною арматурою, виконати експеримент з їх експозицією під впливом постійного та пульсуючого однонаправленого

електричних потенціалів та агресивних середовищ, дослідити наслідки цих впливів та виконати їх порівняльний аналіз;

- розробити рекомендації щодо конструкції і технології виготовлення шпал із бетону з композитною та сталеву арматурою, впровадити результати досліджень.

Наукова новизна:

1) Набули подальшого розвитку уявлення про роботу і напружено-деформований стан під поїзним навантаженням шпал із бетону зі сталеву дротяною та композитною базальтопластиковою арматурою, в яких попередньо напруженим є весь пакет арматури. Зокрема, вперше отримано залежності максимальних значень напружень у бетоні шпал з композитною арматурою під поїзним навантаженням від зусилля натягу арматурного пакету, діаграми деформування моделей таких шпал з різними зусиллями попереднього натягу арматурного пакету.

2) Набули подальшого розвитку уявлення про електричні властивості, корозійну та електрокорозійну поведінку шпал із бетону з композитною базальтопластиковою арматурою. Зокрема, вперше встановлено, що заміна сталеву дротяної арматури композитною обумовлює збільшення електричного опору шпал у 6–16 раз, проте призводить до електроміграційного вилугування бетону під впливом струмів витоку.

Достовірність результатів досліджень забезпечена обґрунтовано обраними стандартними і розробленими оригінальними методами досліджень, їх метрологічним забезпеченням, застосуванням незалежних за фізичними принципами методів досліджень, повторюваністю та статистичною обробкою результатів випробувань, узгодженістю даних, отриманих експериментальними і теоретичними методами.

Практичне значення результатів досліджень полягає у створенні наукових основ для конструювання, виробництва і застосування шпал із бетону з композитною арматурою, які матимуть кращі експлуатаційні якості порівняно зі шпалами зі сталеву дротяною арматурою, а також у наданні

отриманих нових знань студентам – майбутнім фахівцям залізничної і будівельної галузей під час реалізації навчального процесу.

Апробація результатів дисертації. Результати дисертаційного дослідження апробовані на: International Conference on Urban Infrastructure Sustainable Development and Renovation (MistoBud-2025, MistoBud-2024, Харків), Міжнародній науково-технічній конференції «Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті» (Харків, 2025); Міжнародних науково-технічних конференціях «Структуроутворення та руйнування композиційних будівельних матеріалів та конструкцій» (Одеса, 2025, 2024); 10 Міжнародної конференції «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд і будівель на залізничному транспорті» (ТрансБуд-2024, Харків); 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).

Публікації. За результатами дисертаційного дослідження опубліковано 20 наукових праць. Основні результати опубліковані у 7 наукових статтях, з яких 4 у фахових виданнях України категорії Б, 3 статті у виданнях, що індексуються НМБД Scopus, а також у 9 працях апробаційного характеру. Додатково результати досліджень викладені у 2 описах до патентів на корисну модель і 2 описах до заявок на винаходи.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ І НОРМАТИВНИХ ДЖЕРЕЛ З ОСОБЛИВОСТЕЙ КОНСТРУКЦІЇ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЇ ПІДРЕЙКОВИХ ОСНОВ

1.1 Конструкції підрейкових основ залізниць

В Україні створена розвинута мережа залізниць загального користування колії 1520 мм, яка за розгорнутою довжиною понад 27 тис. км посідає 11 місце у світі та 4 у Європі [1, 2]. Вимоги до них унормовані державними будівельними нормами ДБН В.2.3-19 «Залізниця колії 1520 мм. Норми проектування». Їхня остання переглянута версія ДБН В.2.3-19:2025 [3], розроблена Українським державним університетом залізничного транспорту, набула чинності 01.01.2026. Не менш розвинутою є мережа залізниць незагального користування (промислових) колії 1520 (1524) мм, довжина якої у відкритих джерелах відсутня, але відомо, що вона є порівняною із залізницями загального користування. Вимоги до них висуваються згідно з нормативним документом [4].

Вже побудовані та активно продовжують будуватись ділянки залізниць колії 1435 мм, що безпосередньо сполучаються із залізницями країн ЄС [5-7]. Вимоги до них унормовані ДБН В.2.3-20:2025 «Залізниця колії 1435 мм. Норми проектування» [8], розроблений УкрДУЗТ вперше, який також набув чинності 01.01.2026.

Залізниця загального користування згідно з [1, 3, 8] проектується на максимальні навантаження на осі рухомого складу 245 кН або 25,0 тс – для вантажних вагонів, 250 кН або 25,5 тс – для локомотивів. Конструкція верхньої будови колії передбачена у вигляді рейко-шпальної решітки, укладеної на баластну призму, розташовану на основній площадці земляного полотна.

Згідно з [1, 3, 8] потужність конструкції колії призначається залежно від категорій лінії (колій). Сучасна категоризація ліній (колій), унормована у [3, 8, 9] дещо спрощено наведена у табл. 1.1. Як бачимо із табл. 1.1, основними параметрами, що визначають категорію колії, є вантажонапруженість лінії та максимальна швидкість руху нею пасажирських поїздів.

Таблиця 1.1 – Категорії залізничних ліній залежно від умов експлуатації

Категорія залізничних ліній	Призначення залізниць	Розрахункова річна приведена вантажонапруженість (нетто* у вантажному напрямку) на десятий рік експлуатації, млн. т·км бруutto/км за рік	Максимальна швидкість руху пасажирських поїздів, км/год
Швидкісні	Залізничні магістральні лінії	Незалежно від вантажонапруженості	200
I	Залізничні магістральні лінії	Понад 80	160
II	Залізничні магістральні лінії	Понад 50 до 80 включно	140
III	Залізничні магістральні лінії	Понад 30 до 50 включно	120
IV	Залізничні магістральні лінії	Понад 15 до 30 включно	
V	Залізничні лінії	Понад 5 до 15 включно	
VI	Залізничні лінії	Понад 2 до 5 включно	100
VII	Залізничні лінії	2 та менше	80
	Внутрішньостанційні з'єднувальні та під'їзні колії	Незалежно від вантажонапруженості	

Згідно з [3, 8] конструкція верхньої будови колії призначається на лініях категорії:

- швидкісної, I–III – безстикова колія на шпалах залізобетонних, у тому числі з довгими рейковими плітями (довжиною в перегін, блок-ділянку тощо);

- IV–VI – безстикова колія на шпалах залізобетонних, допускається ланкова колія на шпалах залізобетонних або дерев'яних;

- VII – ланкова або безстикова колія на шпалах дерев'яних або залізобетонних, допускається ланкова колія з комбінованою рейко-шпальною решіткою зі шпалами дерев'яними і залізобетонними.

У [3, 8] для будівництва, реконструкції та капітального ремонту залізниць передбачено використовувати для ліній категорії:

- швидкісної, I–V – нові залізобетонні шпали I сорту (для IV–V категорії допускаються старопридатні шпали або нові дерев'яні шпали I типу);

- VI–VII категорій – нові, допускаються старопридатні залізобетонні шпали I або II сорту або дерев'яні I або II типу (товщиною 180 і 160 мм, відповідно).

Для залізобетонних шпал для колії і 1520 і 1435 мм встановлена довжина 2700 мм, за європейськими нормами для колії 1435 мм – 2600 мм. Дерев'яні шпали мають довжину 2750 мм. Залізобетонні та дерев'яні шпали передбачено укладати за епюрами 2000, 1840, 1680 шпал/км в залежності від категорії колії. Основною є епюра 1840 шпал/км. В кривих радіусом меншим встановлених величин (2000 або 1200 м) епюра збільшується до 2000 шпал/км. В станційних коліях VII категорії дерев'яні шпали допускається вкладати за епюрою 1600 шпал/км.

На мостах з їздою по баласту і в тунелях передбачена конструкція колії така ж сама, як і на перегонах. На металевих мостах улаштовується безбаластна колія на залізобетонних плитах безбаластного мостового полотна БМП, дерев'яних брусах, металевих поперечинах. Стрілочні переводи укладаються на баласті на залізобетонних або дерев'яних брусах.

Конструкція залізобетонних шпал (типи та марки) державними нормами [3, 8] не деталізується, лише пов'язується з типом рейок та рейкових скріплень. Типи рейок передбачені Р65 та 60Е1 (UIC60) з масою 65 та 60 кг/пог. м, відповідно. Легші типи рейок – Р50, Р43 допускається експлуатувати до наступної повної заміни рейко-шпальної решітки. Рейкові скріплення застосовуються підкладкові або безпідкладкові з пружними або жорсткими клемами.

Вимоги до конструкції залізничної колії, зокрема, підрейкових основ, деталізуються внутрішнім нормативним документом національного оператора залізничної інфраструктури (Акціонерного товариства

«Українська залізниця», АТ «Укрзалізниця») – «Інструкцією з улаштування та утримання колії залізниць України» [10], розробленою провідними вченими-колійниками України під проводом проф. Е.І. Даніленка. З цією деталізацією узгоджено зміст двотомного базового підручника України для вищих навчальних закладів «Залізнична колія» Е.І. Даніленка [1]. Окремі найбільш важливі для забезпечення безпеки руху вимоги до конструкції колії встановлені юстованим документом АТ «Укрзалізниця» – «Правилами технічної експлуатації залізниць України» [11].

На рівні національного стандарту вимоги до конструкції шпал висуває також розроблений в УкрДУЗТ ДСТУ Б.В.2.6-209 [12, 13], що передбачене ДБН-ми [3, 8]. Оскільки в Україні навіть національні стандарти застосовуються добровільно, допускаються залізобетонні шпали за європейським стандартами ДСТУ EN 13230-1, ДСТУ EN 13230-2, ДСТУ EN 13230-3 або іншими.

У [1] наведено повний діапазон підрейкових основ на залізницях світу:

- шпали – дерев'яні, металеві, залізобетонні;
- залізобетонні плити;
- залізобетонні поздовжні лежні та рами.

Аналіз даних [1, 2, 3, 8, 10] показав, що на залізницях загального користування України основними типами підрейкових основ на перегонах є залізобетонні та дерев'яні шпали. Залізобетонні плити застосовуються тільки на металевих мостах в конструкції безбаластного мостового полотна. Залізобетонні рами були укладені до 1990-х рр. у дослідному порядку тільки в одному із 45 залізничних тунелів України – Лутугинському (Донецька залізниця), який з 2014 р. перебуває на тимчасово окупованій території.

1.2 Особливості конструкції і технології виготовлення залізобетонних шпал

В Україні з 1960-х рр. виготовляються та укладаються залізобетонні попередньо напружені шпали, армовані високоміцним дротом [14]. У [14] міститься найбільш детальна інформація про шпали, застосовувані на залізницях України та інших пострадянських країн. Зокрема, обґрунтовано конструкцію шпал, брусів стрілочних переводів, наведено порядок утримання і ремонту колії із залізобетонними шпалами.

Технологічні лінії з виготовлення таких шпал у довгих 10-місних (2×5) формах тоді були придбані в Угорщині та встановлювались на Київському дослідному заводі залізобетонних шпал (Київському ДЗЗБШ, зараз не існує, маркування шпал «КВ»), Гніванському заводі спецзалізобетону (Гніванському ЗСЗБ, маркування «ГН»), Коростенському заводі залізобетонних шпал (Коростенському ЗЗБШ, маркування «КР»), Кременчуцькому ЗЗБШ (маркування «КМ», зараз не існує). Лінії з короткими 4-місними формами були встановлені на Старокостянтинівському ЗЗБШ (маркування «СТ»). Заводи були побудовані для забезпечення переходу залізниць з ланкової колії на дерев'яних шпалах на безстикovu колію на залізобетонних шпалах. У 1990-ті рр. цей перехід було завершено, потреба у шпалах обмежилась їх заміною під час капітальних ремонтів і з урахуванням ще й повторного укладання старопритатних шпал частина заводів в умовах ринкової економіки припинила існування як підприємства – виробники шпал. Хоча у 2000-х рр. шпали для пружних анкерних скріплень почав випускати Запорізький завод залізобетонних конструкцій, що раніше не спеціалізувався на шпалах (маркування «ЗП»).

З початку виробництва шпал в УкрДУЗТ (тоді Харківський інститут інженерів залізничного транспорту – ХІІТ) наказом Міністерства шляхів сполучення СРСР №45/ЦЗ від 25.05.1965 було створено галузеву науково-дослідну лабораторію залізобетонних шпал (зараз ГНДЛ підрейкових основ і

спеціалізовано), яка спеціалізувалась на удосконаленні технології виготовлення шпал, технологічному забезпеченні їх надійності та довговічності [15-17].

Вимоги до шпал вперше були унормовані на рівні державного стандарту у ГОСТ 10629-63 «Шпалы железобетонные предварительно напряженные для железных дорог колеи 1520 мм. Технические условия», який визначив їх типи та основні параметри, висунув мінімальний об'єм вимог.

Однотипний ГОСТ 10629-76 уточнив типорозміри, геометричні параметри, допуски, масу шпал та матеріали для їх виготовлення, встановив вимоги до контролю якості та випробувань, маркування, правил приймання.

ГОСТ 10629-88 знов уточнив та деталізував положення попередньої редакції, був в більшому ступені гармонізований з іншими ГОСТами, увів вимоги до статистичного контролю міцності бетону тощо.

ДСТУ Б В.2.6-57-2008 «Конструкції будівель та споруд. Шпали залізобетонні попередньо напружені для залізниць колії 1520 мм», розроблений НДІБК і уведений на заміну ГОСТ 10629-88, став першим національним стандартом України, проте фактично був його дослівним перекладом з актуалізованими нормативним посиланнями.

ГОСТ 10629 і ДСТУ Б В.2.6-57 розповсюджувались тільки на шпали для колій 1520 мм типу Ш1 (рис. 1.1) та передбачали можливість встановлення тільки підкладкових клемно-болтових рейкових скріплень типу КБ та похідних від нього, хоча в Україні вже впроваджувались шпали інших типів.

ДСТУ Б В.2.6-209:2016 [12], розроблений УкрДУЗТ і уведений на заміну ДСТУ Б В.2.6-57-2008, було розповсюджено і на шпали для залізниць колії 1435 мм, які вже уклались на прикордонних з країнами ЄС ділянках, і не тільки типу Ш1, а й типу СБ3 (рис. 1.2) під безпідкладкові анкерні пружні рейкові скріплення типу КПП-5, розроблені на основі польських скріплень СБ-3 та привабливі своїми малодетальністю, низькими металомісткістю та трудомісткістю утримання. Шпали типу СБ3 відрізняються від Ш1 наявністю

замурованих у бетон анкерів замість отворів із закладними шайбами для закладних болтів і більшою висотою підрейкового перерізу. У ДСТУ Б В.2.6-209:2016 було підвищено вимоги до класу бетону, вперше унормовано вимоги до електричного опору шпал та бетону. У зміні №1 ДСТУ Б В.2.6-209:2016 [13] його дію було поширено на шпали типу Ш9 для безпідкладкових шурупно-дюбельних пружних рейкових скріплень (рис. 1.3).

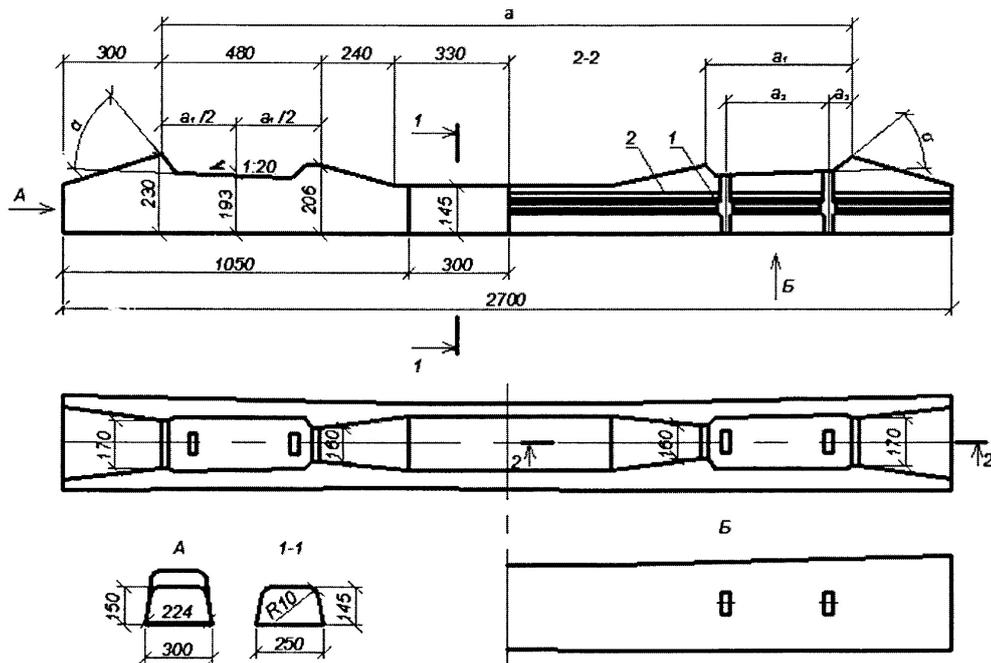


Рис. 1.1 – Конструкція залізобетонної шпали типу Ш1 для підкладкових клемно-болтових рейкових скріплень

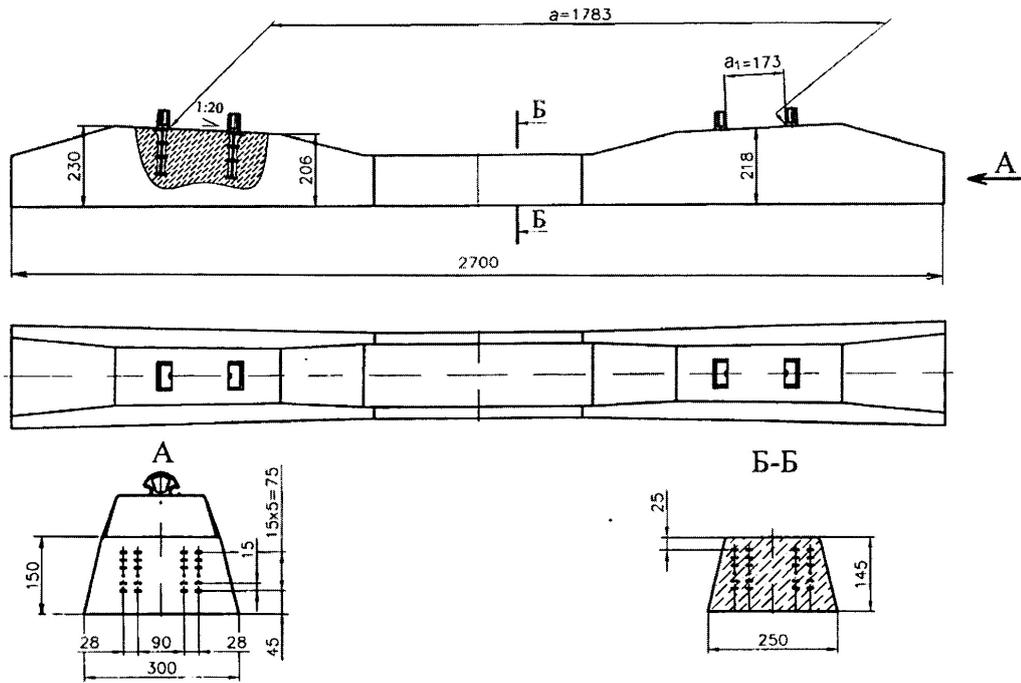


Рис. 1.2 – Конструкція залізобетонних шпал типу СБЗ для безпідкладкових анкерних пружних рейкових скріплень

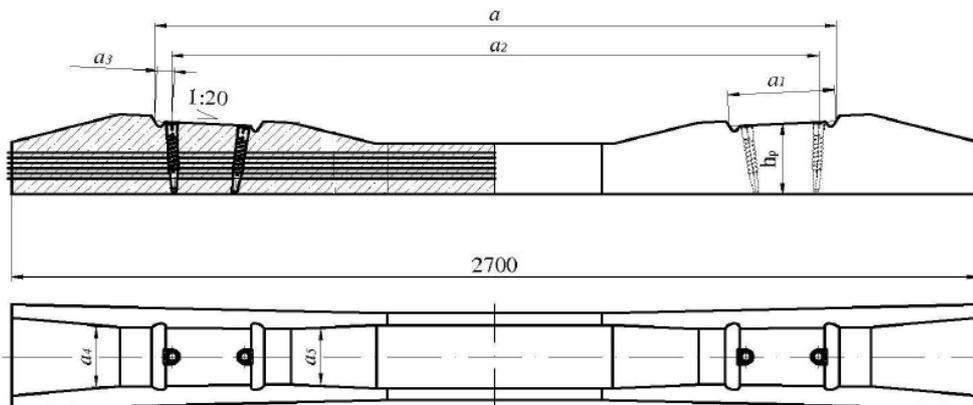


Рис. 1.3 – Конструкція залізобетонних шпал типу Ш9 для безпідкладкових шурупно-дюбельних пружних рейкових скріплень

Отже, зараз в Україні шпали виготовляють згідно з ДСТУ Б В.2.6-209:2016 [12, 13] попередньо напруженими з бетону класу не менше С32/40. Вони запроектовані на відповідність навантаженням, встановленим ДСТУ 7571 [18], а для їх бетону нормуються відповідні суворим умовам експлуатації марки з морозостійкості F200 та водонепроникності W6.

Для армування шпал застосовується високоміцний дріт із вуглецевої сталі $44\text{Ø}3$ мм (рис. 1.4), натяг якої із зусиллям 358 кН здійснюється на форму і передається на бетон після досягнення ним передаточної міцності не менше 32 МПа. На торцях шпал залишаються допущені чинними нормами випуски арматури, що призводить до участі арматури в колах струмів витоку та, відповідно, збільшенню втрат тягових струмів, створенню умов для електрокорозії.

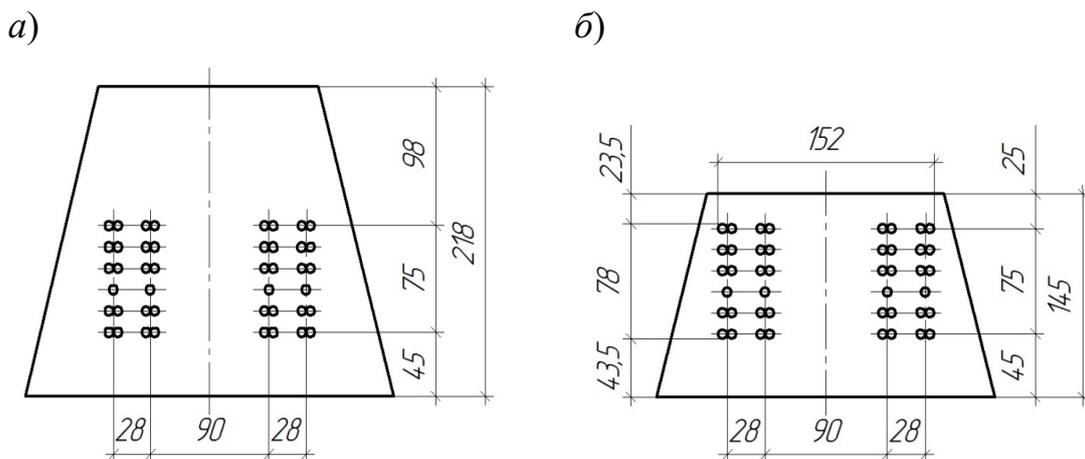


Рис. 1.4 – Армування залізобетонних попередньо напружених залізобетонних шпал, армованих високоміцним дротом – схема розташування високоміцного дроту в поперечних перерізах шпали: а – підрейкових; б – середніх

У світі в найбільш сучасних технологіях [19, 20] застосовується стержнева гладка арматура, а її попереднє напруження передається на бетон не по всій її довжині за рахунок періодичного профілю арматури, а через анкерні пластини, заглиблені в бетон на торцях шпали (рис. 1.5) [21]. Для цього застосовується гладка або низькопрофільна арматура з нарізаною на кінцях різьбою з гайками або висадженими головками по 4 або 8 стержнів на шпалу, на яку попередньо встановлюються анкерні пластини з отворами для арматури і пропускання натяжних болтів. Натяг арматури на форми здійснюється гайковертами за допомогою пропущених через отвори в торцях форми натяжних болтів та встановлених за анкерними пластинами гайок. Із задньої сторони форми арматура закріплюється подібним же чином.

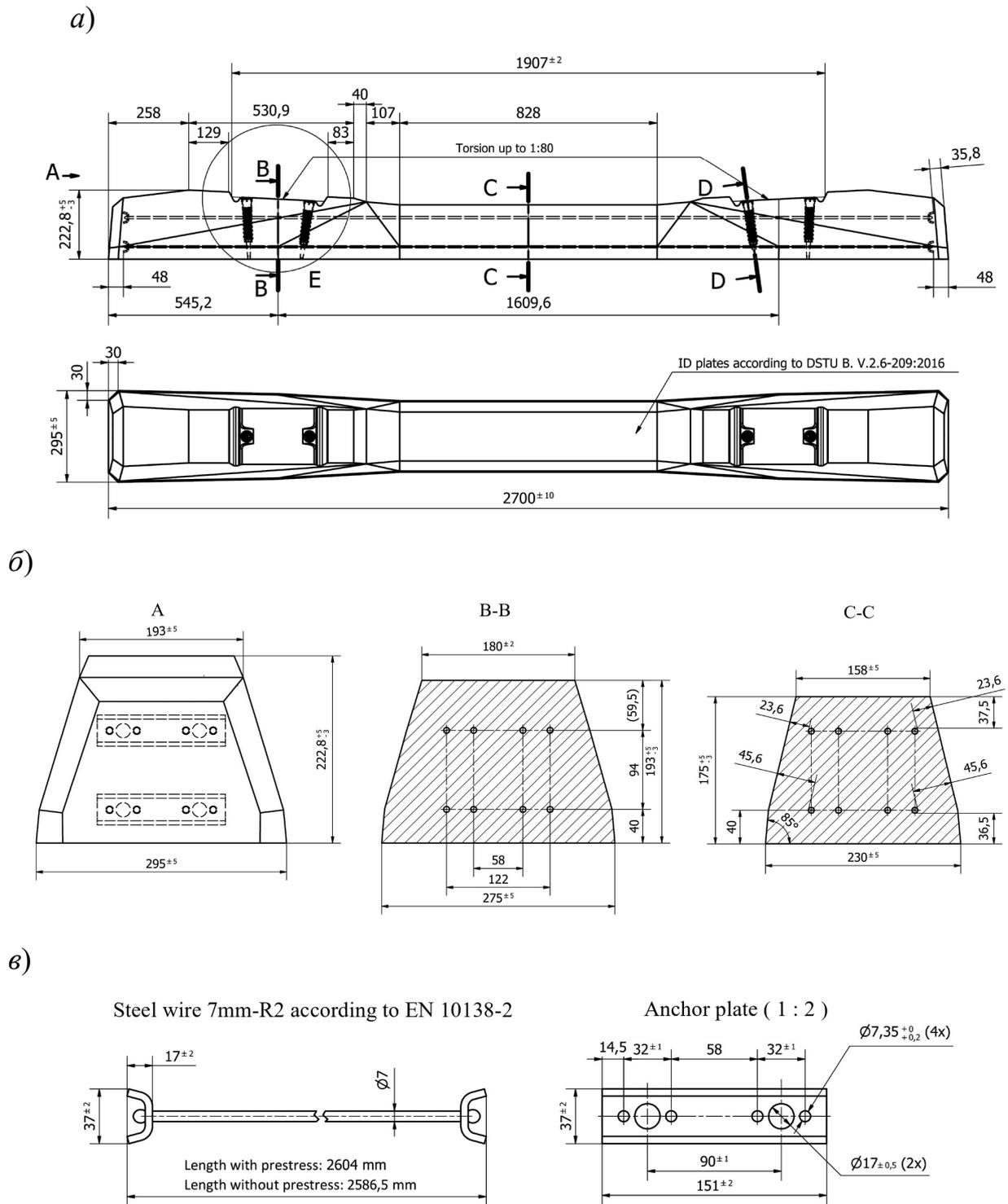


Рис. 1.5 – Конструкція залізобетонних шпал з анкерованою арматурою:
 а – фасад і план; б – бічний фасад і поперечні перерізи;
 в – арматура з анкерними пластинами

Натяг може здійснюватися і безпосередньо за різьбу на кінцях арматури за допомогою гайок складної форми з циліндричним подовженням, яке

пропускається через отвір у торці форми. Передавання напруження з форми на бетон здійснюють після набором бетоном передаточної міцності викручуванням натяжних болтів або гайок.

Натяг може здійснюватися і на затверділий бетон вже розпалубленої шпали [22]. В цьому випадку U-подібну петлю арматури заводять у сформовані пустотоутворювачами канали та хрестоподібні заглиблення на задньому торці й натягують гайками, які залишаються в бетоні.

Утворені після видалення натяжних болтів отвори у бетоні торців шпал заповнюють цементно-піщаним розчином товщиною декілька десятків міліметрів, отже, захищають їм кінці арматури. Це мінімізує участь арматури в колах струмів витоку на електрифікованих залізницях, мінімізуючи у свою чергу втрату тягових струмів та електрокорозійні процеси.

1.3 Аналіз стану шпального господарства залізниць України

В таблиці 1.2 опрацьовано основні показники колійного, у т.ч. шпального господарства залізниць України станом на 01.01.2020 і 01.01.2021 за крайніми відкритими довоєнними даними [2].

Як бачимо із табл. 1.2, 88,3 % головних колій і 66,5 % станційних колій укладено на залізобетонних шпалах (рис. 1.6), на яких укладено переважно рейки Р65.

Таблиця 1.2 – Основні показники колійного, у т.ч. шпального господарства залізниць України станом на 01.01.2020 і 01.01.2021

Найменування показників	Од. вим.	Величина			
		2020		2021	
		натур. показн.	%	натур. показн.	%
1	2	3	4	5	6
<i>Головні колії</i>					
Експлуатаційна довжина, у т.ч.:	км	19820,2		19811,5	
- 2 колії та більше	«	6843,2	34,5	6843,2	34,5
Розгорнута довжина, у т.ч.:	«	27070,4		27062,3	
- з рейками Р65	«	25389,7	93,8	25412,5	93,9
- на щебеновому баласті	«	23902	88,3	23902	88,3
- на залізобетонних шпалах	«	23862,5	88,1	23902	88,3
- безстикової колії	«	20791,7	76,8	20855,6	77,1
- безстикової колії довжиною в перегін	«	4117,9	15,2	4146,4	15,3
- безстикової колії довжиною в блок-дільницю	«	2719,8	10,0	2696,7	10,0
- з клемно-болтовими скріпленнями КБ-65	«	18531	68,5	18727,3	69,2
- з пружними анкерними скріпленнями КПП-5	«	5241,1	19,4	5241,2	19,4
- з пружними анкерними скріпленнями Vossloh SB-4	«	1,9	0,01	1,9	0,01
- з пружними анкерними скріпленнями Pandrol Fastclip	«	1	0,004	1	0,004
- з шурупно-дюбельними пружними скріпленнями Schwihag	«		0	102,8	0,38
Залізобетонних шпал у колії, у т.ч.:	тис.шт.	44212,5		44304,8	
- непридатних		178,2	0,403	182,7	0,412
Простроченість:					
- капітальним ремонтом	км	2717	10,0	2888,7	10,7
- капітальним ремонтом з використанням староприсадатних рейок	«	1267	5,0	1311,9	4,8
- капітальним ремонтом з використанням староприсадатних матеріалів	«	5161,3	21,6	5571,5	20,6
<i>Станційні колії</i>					
Повна довжина, у т.ч.	км	12220,8		12170,4	
- на Р65	«	8984,2	73,5	8995	73,9
- на щебеновому баласті	«	10881,8	89,0	10845,5	89,1
- на залізобетонних шпалах	«	8080,1	66,1	8092,1	66,5
- безстикової колії	«	1575,9	12,9	1997,5	16,4
Залізобетонних шпал у колії, у т.ч.	тис.шт.	13546		13573,3	
- непридатних	«	67,6	0,499	71,3	0,525
<i>Під'їзні колії</i>					
Повна довжина	км	2294		2197	

Продовження таблиці 1.2

1	2	3	4	5	6
<i>Стрілочні переводи</i>					
Загальна кількість, у т.ч.	компл.	44297		43898	
- Р65	«	30955	69,9	31045	70,7
- на залізобетонних брусах	«	24512	55,3	24756	56,4
- подвійних перехресних	«	124	0,28	122	0,28
- марки 1/18	«	95	0,21	95	0,22
<i>Залізничні переїзди</i>					
Всього, у т.ч.:	шт.	4931		4915	
з черговим	«	1277	25,9	1272	25,9
у т.ч. обладнаних автоматикою	«	1245	25,2	1242	25,3
без чергового	«	3654	74,1	3643	74,1
у т.ч. обладнаних автоматикою	«	2509	50,9	2515	51,2
<i>Категорійність головних колій</i>					
I	км	2484,8	9,2	2551,6	9,4
II	«	3735,2	13,8	3205,8	11,8
III	«	5101,1	18,8	5170,3	19,1
IV	«	4782,1	17,7	4711,5	17,4
V	«	2870,6	10,6	2684,3	9,9
VI	«	4094,7	15,1	4772	17,6
VII	«	4002	14,8	3966,9	14,7

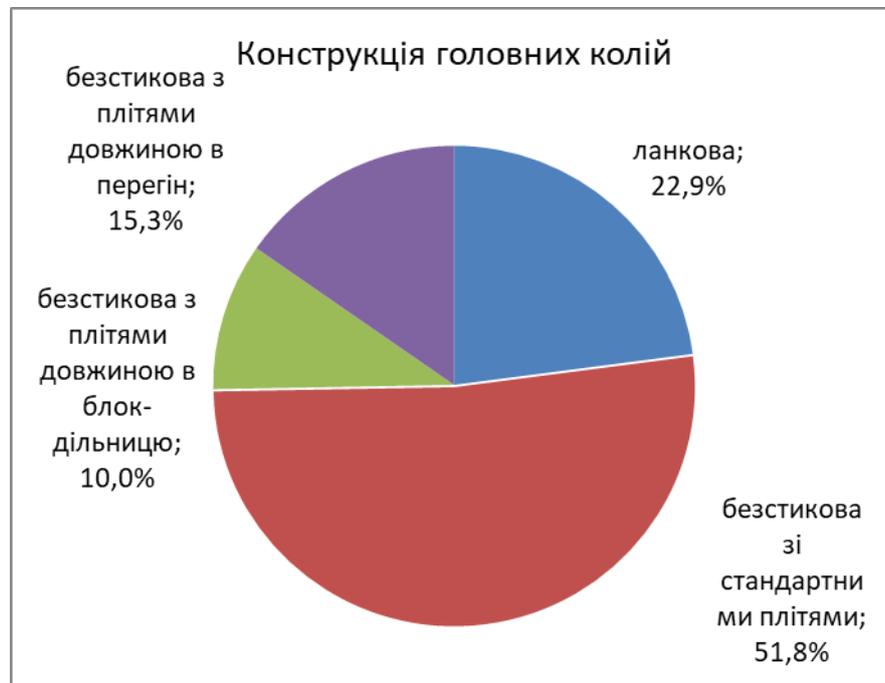


Рис. 1.6 – Розподіл головних колій по довжині за конструкцією колії за станом на 01.01.2025

Більшість головних колій – 77,1 % з безстиковою колією, у т.ч. 15,3 % з плітьми довжиною в перегін, 10 % – з плітьми довжиною в блок-дільницю (рис. 1.7, *a*). Всі вони на залізобетонних шпалах, які укладені на 88,3 % головних колій (рис. 1.7, *б*).

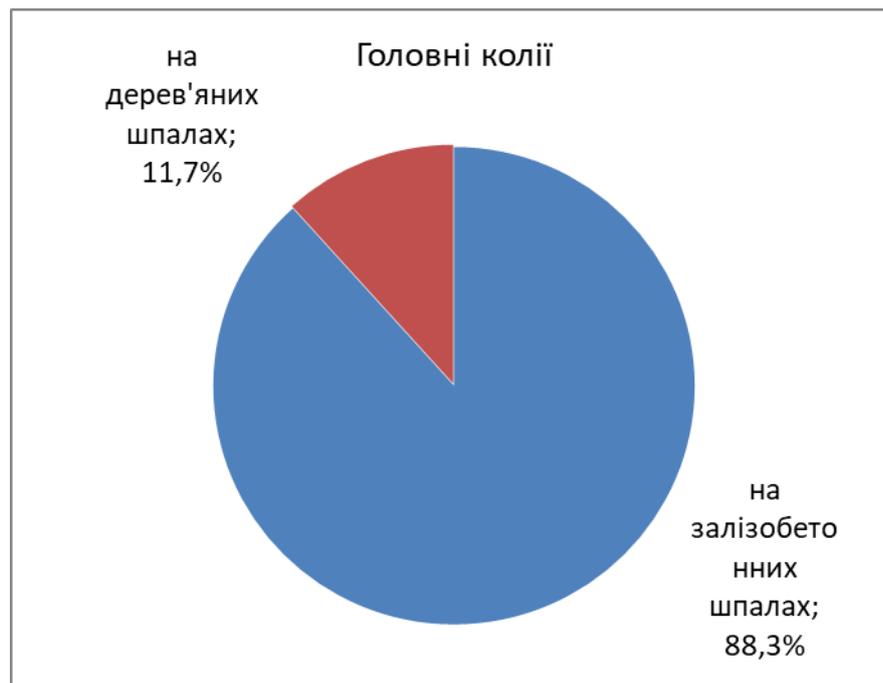
69,2 % головних колій з клемно-болтовими проміжними рейковими скріпленнями, 19,4 % – з пружними анкерними, 0,4 % – з пружними шурупно-дюбельними (рис. 1.8, *a*).

На значній кількості колій капітальні ремонти згідно з [9] прострочені, зокрема: на 20,6 % – капітальні ремонти (з використанням нових матеріалів); на 4,8 % – капітальні ремонти з використанням старопридатних рейок; на 10,7 % – капітальні ремонти з використанням старопридатних матеріалів (рис. 1.8, *б*). Це колії, відповідно, I–III, IV–V, VI–VII категорій.

Отже, як видно із аналізованих джерел і табл. 1.2, найбільш характерною і масовою конструкцією колії на залізницях загального користування України є колія з рейками Р65 на залізобетонних шпалах довжиною 2700 мм з епурою 1840 шт./км переважно з клемно-болтовими проміжним рейковими скріпленнями (69,2 %) та значною часткою пружних анкерних скріплень (19,4 %), розрахована на осьове навантаження 245 кН (25 тс). Саме ці характеристик прийняті далі для аналізу і розрахунків.

В таблиці 1.3 і рис. 1.9 опрацьовано стан шпального господарства однієї з характерних дистанцій колії АТ «Укрзалізниця» – Харківської станом на 01.11.2025. Експлуатаційна довжина колій дистанції складає 181,8 км, розгорнута довжина – 277,8 км, що відповідає 0,92 % і 1,03 % від довжини всіх колій мережі залізниць загального користування України. Всі головні колії і переважна більшість станційних і приймально-відправних колій дистанції електрифіковані постійним струмом.

а)



б)

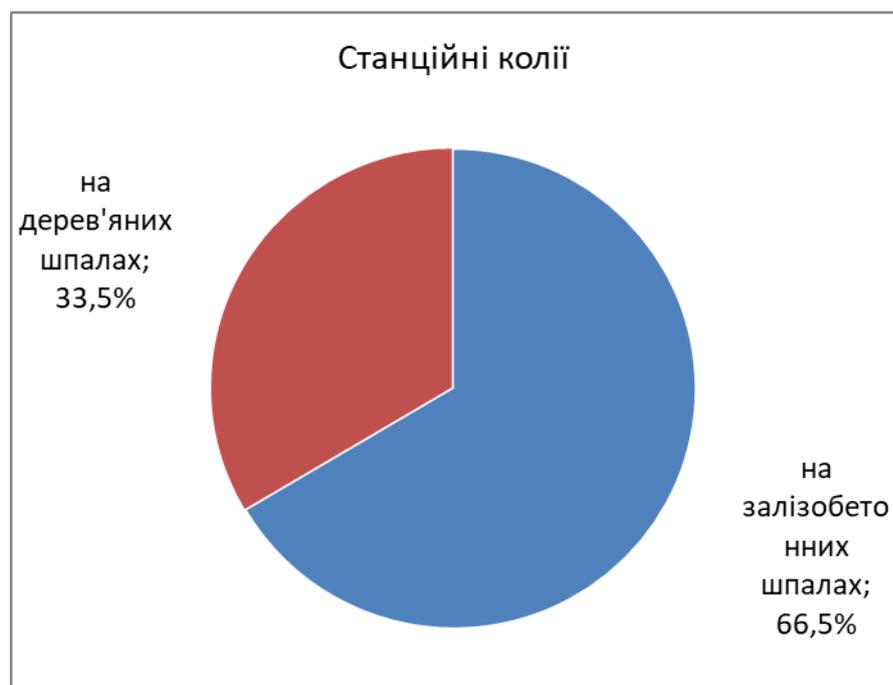
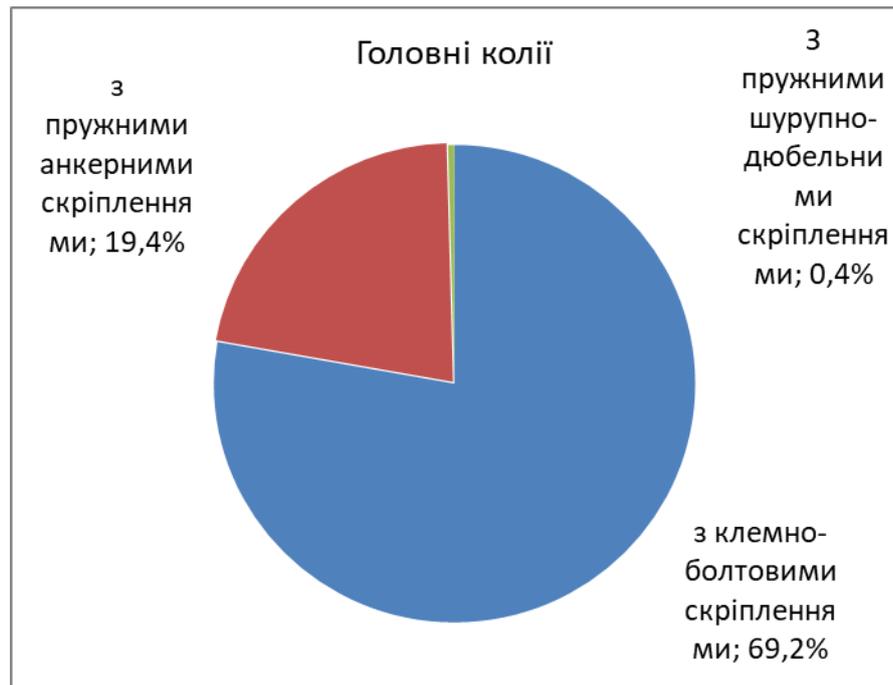


Рис. 1.7 – Розподіл колій по довжині за видом шпал за станом на 01.01.2025:

a – головних; *б* – станційних

а)



б)

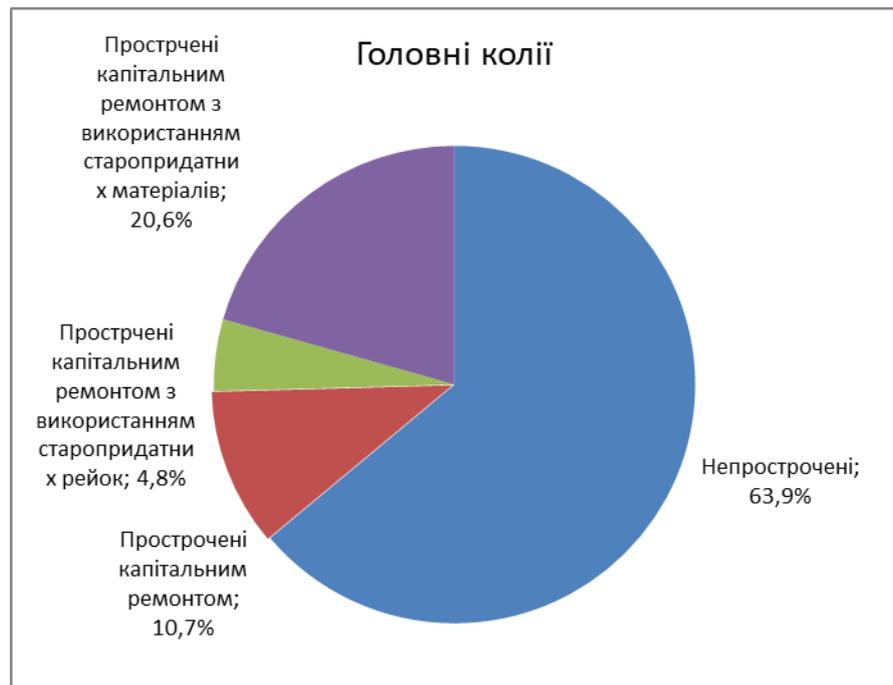


Рис. 1.8 – Розподіл головних колій по довжині за станом на 01.01.2025:

а – за типом проміжних рейкових скріплень; б – за простроченістю капітальних ремонтів

Таблиця 1.3 – Кількість і стан шпал, що лежать у колії в Харківській дистанції колії за станом на 01.11.2025

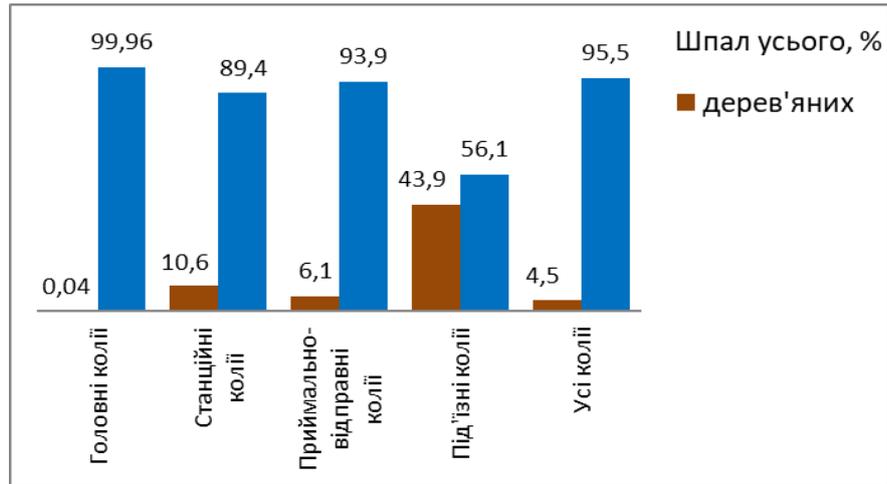
Призначення колій	Кількість шпал												
	Усього, шт.	Усього				Непридатних, що підлягають заміні				Непридатних в куцах із трьох і більше			
		Дерев'яних		Залізо-бетонних		Дерев'яних		Залізо-бетонних		Дерев'яних		Залізо-бетонних	
		шт.	%	шт.	%	шт.	%	шт.	%	шт.	%	шт.	%
Головні	485900	203	0,04	485697	99,96	42	20,7	590	0,12	1	0,5	0	0
Станційні	247777	26374	10,6	221403	89,4	5769	21,9	154	0,07	772	2,9	0	0
Приймально-відправні	119430	7291	6,1	112139	93,9	1408	19,3	32	0,03	99	1,4	0	0
Під'їзні	10895	4778	43,9	6117	56,1	2945	61,6	164	2,68	1190	24,9	7	0,11
Усього	864002	38646	4,5	825356	95,5	10164	26,3	940	0,11	2062	5,3	7	0,00

Порівняння табл. 1.3 і табл. 1.2 показує, що по дистанції колії укладено 1,87 % всіх залізобетонних шпал мережі залізниць загального користування. Отже, Харківська дистанція в цілому є характерною для мережі залізниць загального користування з деяким перевищенням середнього рівня за протяжністю двоколієвих ділянок і часткою залізобетонних шпал. Тому аналіз її шпального господарства в цілому відбиватиме середні показники по всій мережі.

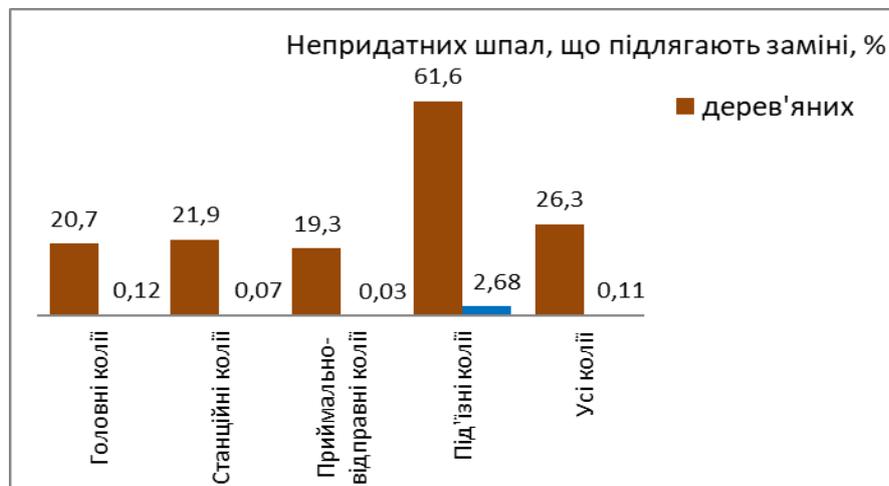
Як бачимо із табл. 1.3, в колію укладена переважна більшість залізобетонних шпал – від 56,1 % у під'їзних коліях до 100 % у головних коліях, в середньому 95,5 % (рис. 1.9, а).

В колії лежить мінімальна кількість непридатних залізобетонних шпал – від 0,03 % у приймально-відправних коліях до 0,12 % у головних коліях, в середньому 0,11 % (рис. 1.9, б). Це на два порядки менше, ніж дерев'яних шпал, яких несправних лежить від 19,3 % у приймально-відправних коліях до 61,6 % у під'їзних коліях, в середньому 26,3 % (рис. 1.9, б).

а)



б)



в)

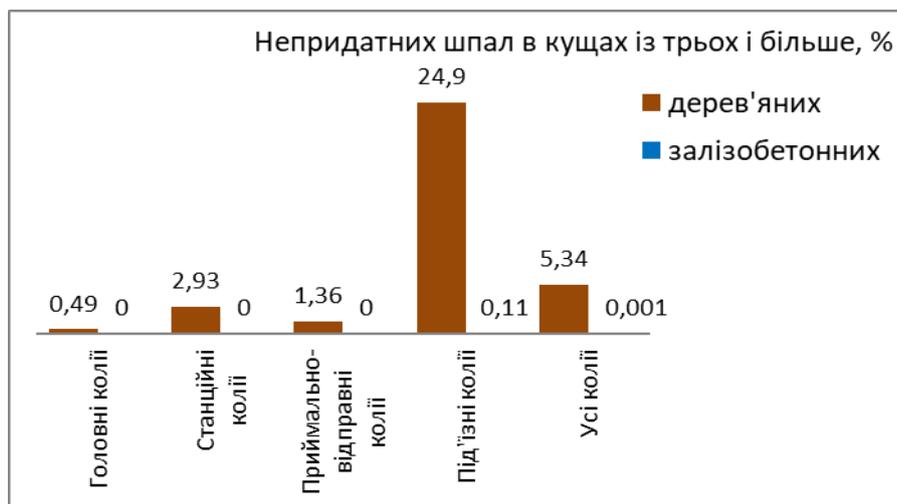


Рис. 1.9 – Характеристики шпального господарства дистанції колії: а – відсоткова кількість дерев'яних та залізобетонних шпал; б – відсоток непридатних дерев'яних та залізобетонних шпал; в – відсоток непридатних дерев'яних та залізобетонних шпал в куцах

Непридатних залізобетонних шпал в куцах із трьох та більше майже немає – лише 0,11 % у під'їзних коліях, тоді як куцова непридатність дерев'яних шпал складає від 0,49 % в головних коліях до 24,9 % в під'їзних коліях, в середньому 5,34 % (рис. 1.9, в).

Це свідчить про набагато більший ресурс залізобетонних шпал порівняно з дерев'яними, а також на більш досконалу систему утримання та ремонту колії на них (колій більш високих категорій) та її фінансування. Проте значна абсолютна кількість несправних залізобетонних шпал в коліях мережі залізниць загального користування – 245,8 тис. шт. у 2020 р. і 254 тис. шт. у 2021 р. та тенденція збільшення цієї кількості робить підвищення ресурсу шпал із бетону актуальним завданням.

1.4 Аналіз пошкоджень шпал

Несправності залізобетонних шпал – дефекти каталогізовані з призначенням шифрів у [23] з метою визначення придатності знятих з колії шпал для повторного використання як старопридатних.

У галузі будівництва терміни «дефекти» і «пошкодження» є усталеними і унормованими, наприклад, у [24]. Під «дефектами» розуміють несправності, які виникли під час проєктування, виготовлення, зведення конструкцій до їх уведення в експлуатацію. Під «пошкодженнями» розуміють несправності, які утворились від зовнішніх впливів під час експлуатації. Отже, дефекти конструкцій верхньої будови колії, каталогізовані [23, 25], правильно називати пошкодженнями і далі в роботі використовується саме цей термін.

Всі передбачені [23] пошкодження (дефекти) залізобетонних шпал є механічними – тріщинами, відколами тощо. Корозійні пошкодження залишились поза увагою авторів [23].

Разом з тим у [26–30] показано, що у шпалах утворюються і корозійні пошкодження, у т.ч. у вигляді сітки тріщин. Як на причину утворення сітки

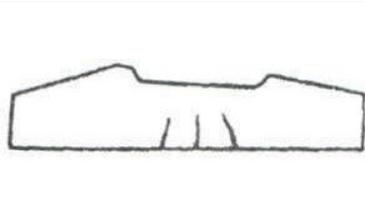
тріщин вказується внутрішня корозія бетону від взаємодії реакційно-здатних заповнювачів з лугами цементу (Alkali-Silica-Reaction – ASR) [31–38].

У [30, 39, 40, 41] наведено результати статистичного аналізу пошкоджень (дефектів) у залізобетонних шпалах з пружними анкерними скріпленнями, укладених на мережі загального користування на різних залізницях, які передують досягненням шпалами несправного стану. Каталог [23] запропоновано доповнити новими пошкодженнями та відповідними їм шифрами, які вже враховують їх корозійний характер. У табл. 1.4 узагальнено ранжування пошкоджень за їх повторюваністю серед всіх пошкоджень, а також їх причин.

Таблиця 1.4 – Рейтинг пошкоджень (дефектів) залізобетонних шпал за розповсюдженістю та причини їх утворення

№	Шифр за [23] і [30]	Вигляд пошкодження	% шпал від усіх пошкоджених*	Опис. Причини утворення. Вплив ASR на утворення
1	2	3	4	5
1	12.1в		41,4	Стирання кінця шпали від обтрусення. Осідання баласту під підрейковими площадками, злам шпали від поїзного навантаження. Корозія від ASR не впливає
2	12.1		24,1	Поперечні тріщини посередині шпали. Осідання баласту під підрейковими площадками, злам шпали від поїзного навантаження. Корозія від ASR сприяє суттєво
3	<u>13.1</u> 13.2		20,0	Поперечні тріщини в зоні анкерів. Виникнення тріщин від горизонтальної складової навантаження на анкер скріплення. Сприяє осідання баласту під підрейковими площадками та зміщення вниз арматури. Корозія від ASR сприяє певною мірою

Продовження таблиці 1.4

1	2	3	4	5
4	<u>22.1</u> 22.2		19,4	Подовжні тріщини в торці шпали. Нерівномірне осідання баласту під підрейковими площадками, виникнення дотичних напружень, тріщин, відколу від нерівножорсткості основи. Сприяє вплив попереднього напруження арматури. Корозія від ASR сприяє суттєво
5	12.16		18,0	Сітка тріщин на поверхнях шпали, переважно на кінцях. Корозія від ASR є безпосередньою причиною утворення сітки тріщин, яка розвивається від попереминого заморожування і танення. Сприяє утворенню та розвитку інших пошкоджень
6	<u>11.1</u> 11.2		4,5	Поперечні тріщини в підрейковому перерізі знизу шпали. Осідання баласту під підрейковими площадками, виникнення тріщин від поїзного навантаження. Корозія від ASR сприяє певною мірою
7	21.1		2,4	Подовжня тріщина через анкери або отвори для закладних болтів. Виникнення тріщин від горизонтальної складової навантаження на анкер. Корозія від ASR сприяє певною мірою
8	21.1a		2,1	Подовжні тріщини в середній частині шпали. Корозія заповнювачів лугами цементу, виникнення тріщин від попереднього напруження арматури внаслідок втрати міцності бетоном Корозія від ASR сприяє суттєво
9	12.1a		окремі	Поперечні тріщини на кінцях шпали зверху. Удар робочих органів колійних машин. Корозія від ASR сприяє певною мірою

Продовження таблиці 1.4

1	2	3	4	5
10	21.16		окремі	Оголення робочої арматури на верхній грані шпали. Зміщення арматури під час вібраційного формування шпали. Корозія від ASR не впливає

* Сума відсотків не дорівнює 100 через наявність в частині пошкоджених шпал декількох пошкоджень одночасно

Аналіз табл. 1.4 показав, що на утворення і розвиток пошкоджень в різному ступені впливає внутрішня корозія бетону від взаємодії реакційно-здатних заповнювачів з лугами цементу ASR (рис. 1.10): на 34,5 % не впливає, на 22,4 % впливає певною мірою, на 28 % може впливати певною мірою, 15 % є безпосередньо ознаками ASR. Отже, внутрішня корозія бетону від ASR в різному ступені впливає на виникнення і розвиток 65,5 % пошкоджень залізобетонних шпал.



Рис. 1.10 – Частка пошкоджень шпал, яким сприяє внутрішня корозія бетону від взаємодії реакційно-здатних заповнювачів з лугами цементу (Alkali-Silica-Reaction – ASR)

1.5 Участь залізобетонних шпал в електричних колах та електрокорозійних процесах

Споруди залізничного транспорту – підрейкові основи, мости, водопропускні труби, тунелі, пасажирські та вантажні платформи тощо – експлуатуються в особливо складних умовах. Додатково до навантажень від рухомого складу, атмосферних впливів вони зазнають вібрації, абразивного впливу потоку повітря з частинками баласту від руху поїздів, впливу електричних струмів витоку з рейок. Руйнівний вплив постійного струму витоку на металеві конструкції та арматуру залізобетону відомий, заходи захисту від нього навіть унормовані, проте не завжди ефективно запобігають електрокорозії арматури. У роботах УкрДУЗТ [42, 43] в результаті теоретичних та експериментальних досліджень показано, що завдяки особливому пульсуючому через рух поїздів режиму струму бетон також зазнає електрокорозії, яка полягає в його електроміграційному вилигуванні. Проте в зазначених експериментальних дослідженнях впливу електричного струму піддавали зразки лише бетону. У [44] проаналізовано шляхи струму крізь бетон і арматуру залізобетонної шпали і показано їхній взаємний вплив, який локалізує зони корозії і визначає її інтенсивність для арматури і бетону. Проте вплив пульсуючого однонаправленого електричного потенціалу на зразки бетону з арматурою (моделі шпал) експериментально не вивчався.

Електрокорозія залізобетонних конструкцій не піддається сумніву, активно досліджується, розробляються заходи з захисту від неї [45–48]. У роботі [49] для залізобетону транспортних споруд пропонується алгоритм оцінювання її ризику на основі статистичних методів. Проте ушкодження бетону в цих конструкціях звичайно пов'язують із тиском продуктів корозії арматури, статичними та динамічними навантаженнями, морозним руйнуванням, корозією в різних агресивних середовищах і не пов'язують із безпосереднім впливом електричних струмів [50]. Для підвищення стійкості

шпал до зазначених механічних і фізичних впливів а, отже, підвищення ресурсу для їх виготовлення застосовують високофункціональні бетони [51], дисперсно-армовані сталевую або полімерною фіброю фібробетони [52]. Ці бетони мають вищі показники міцності, у т. ч. ударної, зносостійкості, а також водонепроникності, морозостійкості, але їхні електротехнічні властивості не аналізуються і не регулюються, а в роботі [53] зазначено електрокорозійні пошкодження сталеві фібробетону.

У роботах [42–44] у результаті теоретичних та експериментальних досліджень доведено, що завдяки особливому пульсуючому синхронному руху поїздів, режиму струму бетон залізничних споруд також зазнає електрокорозії, яка полягає в його електроміграційному вилуговуванні. Крім того, показано, що такий пульсуючий однонаправлений електричний потенціал (ПОЕП) може інтенсифікувати за рахунок електроміграційного перенесення внутрішню корозію бетону від взаємодії луг цементу з реакційно здатними заповнювачами ASR за [33, 54, 55]. Проте в зазначених експериментальних дослідженнях впливу електричного струму піддавали зразки лише бетону. У роботі [44] проаналізовано шляхи струму крізь бетон і арматуру залізобетонної шпали і показано їхній взаємний вплив, який локалізує зони корозії і визначає її інтенсивність для арматури і бетону. Отже, регулювання електротехнічних властивостей бетону як провідника другого роду та/або застосування електропровідних композицій для екранів-покриттів може запобігти утворенню зазначених зон корозії. Рекомендовано також заходи з дренажу струмів, що стікають з рейок крізь шпали та запропоновано виключити допущені випуски арматури з їхніх торців [44].

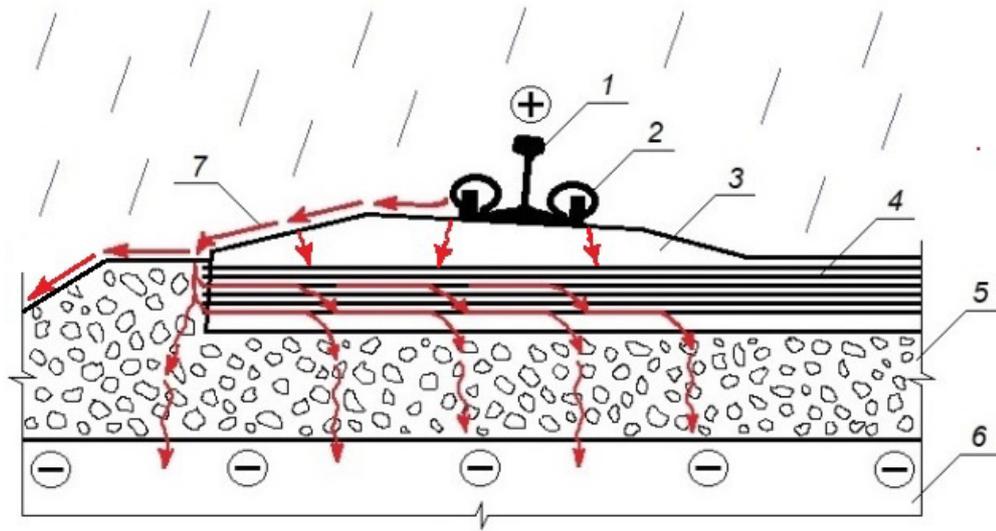
У світі успішно розробляють і удосконалюють бетони та суміші з керованою електропровідністю, яка регулюється переважно вуглеграфітовими наповнювачами [56, 57]. Їх застосовують переважно для нагрівальних елементів змінного струму різного призначення. Доведено доцільність застосування електропровідних композицій, здатних дренажувати струми з залізобетонних конструкцій, у т. ч. шпал [44].

Відомо, що під впливом постійних струмів, зокрема струмів витоку з електрифікованих рейкових колій залізниць металеві конструкції та арматура залізобетонних конструкцій [46, 58], зазнають електрокорозії [48, 59]. Електрокорозійні пошкодження спостерігаються також у сталевібробетоні [60].

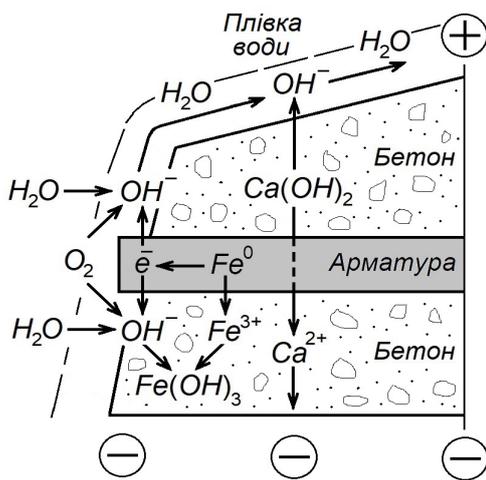
В [58] та інших роботах авторів доводиться, що від впливом постійного або однонаправленого пульсуючого електричного потенціалу утворюються струми витоку (рис. 1.11, *a*) та відбуваються процеси електрокорозії бетону, які полягають у багатократній інтенсифікації відомих видів корозії, залежних від процесів перенесення іонів – вилуговування (рис. 1.11, *б*), внутрішньої корозії від лужно-кремнеземистої реакції (рис. 1.11, *в*) тощо. У [61] доведено, що електричні потенціали прискорюють вилуговування за рахунок перенесення іонів та призводять до утворення градієнтів властивостей бетону в конструкціях.

Для досліджень електрокорозійних процесів використовують різні теоретичні та експериментальні методи аж до метода скінчених елементів [47, 62]. Але цими методами вивчається переважно електрокорозія арматури. У [58] та інших роботах авторів корозійний вплив електричного струму на бетон досліджувався за допомогою визначення зміни щільності та міцності бетону, електричних вимірювань, рН-метрії, оптичної та електронної мікроскопії, рентгенофазового аналізу, інфрачервоної спектроскопії. Ці методи не завжди точні, але є незалежними і доповнюють один одного.

а)



б)



в)

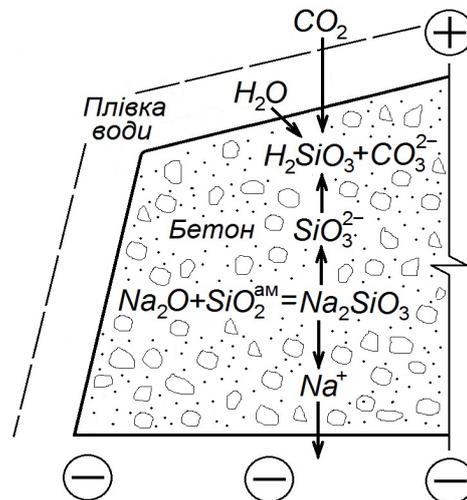


Рис. 1.11 Схема протікання струму витoku у вологу погоду [58]: 1 – крізь шпалу та баласт; б – крізь бетон і сталеву арматуру шпали; в – крізь бетон шпали з інтенсифікацією його корозії від ASR; 1 – рейка; 2 – рейкове скріплення; 3 – бетон шпали; 4 – арматурний дріт; 5 – баласт; б – земляне полотно; 7 – струм витoku

У [63] встановлено кореляцію між відношенням Ca/Si та мікромеханічними властивостями цементного каменю та запропоновано використовувати цю кореляцію для вивчення наслідків вилигування. Для визначення мікромеханічних властивостей у [63] використовується метод наноіндентування. У [64] обґрунтовано застосування цього методу для

дослідження наслідків електричних впливів на бетон. Вважаємо, що цей метод як незалежний добре доповнює відомі методи дослідження електрокорозійних процесів в бетоні та дозволяє підвищити достовірність результатів досліджень.

Згідно з [65] наявність в залізобетонних шпалах сталеві арматури спричиняє їх високу електропровідність, особливо за наявності мікротріщин, характерних для конструкцій, що згинаються або позацентрово стискаються. На електрифікованих ділянках залізниць шпали знаходяться в зоні впливу електричних потенціалів і струмів [65]. В аналогічних умовах експлуатуються шпали колій метрополітену, трамвайних ліній [66]. Електричні потенціали та струми обумовлюють електрокорозію сталеві арматури [67, 68] та бетону [68]. Підвищена електропровідність шпал сприяє на електрифікованих ділянках втратам тягового струму, на ділянках, електрифікованих постійним струмом, – стіканню на навколишні конструкції корозійних струмів, на ділянках СЦБ з рейковими ланцюгами – до перешкод в їх роботі. Зазначені недоліки цих шпал обумовлюють високу вартість будівництва та експлуатації залізниць, вимагають додаткових витрат щодо підвищення ресурсу та довговічності конструкцій колії, забезпечення безпеки руху.

1.6 Залізничні шпали з альтернативних матеріалів

В роботі [69] наведені результати досліджень впливу властивостей бетону на властивості залізобетонних шпал. Показано, що підвищення міцності бетону, наприклад, за рахунок використання лужноактивованих цементів, забезпечує підвищення довговічності шпал. Такий бетон безумовно матиме і меншу електропровідність. Але залишились невирішеними питання зниження електропровідності шпал в цілому. Причиною цього може бути те, що автори не піддали сумніву необхідність застосування сталеві арматури через те, що вона забезпечує їх тріщиностійкість.

Варіантом подолання відповідних труднощів може бути використання шпал із повністю неелектропровідного матеріалу. Саме такий підхід використаний в роботі [70], де досліджуються композитні шпали із вторинних полімерів. Однак самі ж автори встановили, що такі шпали мають надто високу деформативність через повзучість полімеру, який крім того ще й може деградувати від інсоляції. Тому використання таких шпал матиме ряд обмежень, особливо на магістральних лініях залізниць.

Ще одним варіантом може бути дисперсне армування шпал неелектропровідними синтетичними волокнами. Саме такий підхід використаний в роботі [71], де досліджуються шпали, армовані поліпропіленовою макрофіброю. Однак залишились невирішеними питання забезпечення довговічності шпал. Причиною цього може бути відсутність попереднього напруження бетону і тому неможливість забезпечити потрібну тріщиностійкість а, отже, недостатня довговічність і високі експлуатаційні витрати на заміну пошкоджених шпал.

Низьку електропровідність мають добре просочені масляними антисептиками дерев'яні шпали. Проте у [72] показано, що дерев'яні шпали схильні до утворення тріщин внаслідок вологих деформацій та біологічних ушкоджень, мають низьку зносостійкість у підрейковій зоні.

Сталеві шпали характеризуються високими міцністю, зносостійкістю. Проте у [73] показано, що сталеві шпали коробчастого перерізу схильні до корозії та електрокорозії, мають надто високу електропровідність, створюють великий шум під час руху поїздів, підрейкова основа з них характеризується високою металоємністю.

Недоліків дерев'яних шпал позбавлені залізобетонні шпали, проте згідно з [65] наявність в залізобетонних шпалах сталеві арматури спричиняє їх високу електропровідність, особливо за наявності мікротріщин, характерних для конструкцій, що згинаються або позацентрово стискаються. На електрифікованих ділянках залізниць шпали знаходяться в зоні впливу електричних потенціалів і струмів [65]. В аналогічних умовах

експлуатуються шпали колій метрополітену, трамвайних ліній [66]. Електричні потенціали та струми обумовлюють електрокорозію сталевій арматури [67, 68] та бетону [68]. Підвищена електропровідність шпал сприяє на електрифікованих ділянках втратам тягового струму, на ділянках, електрифікованих постійним струмом, – стіканню на навколишні конструкції корозійних струмів, на ділянках СЦБ з рейковими колами – до перешкод в їх роботі. Зазначені недоліки цих шпал обумовлюють високу вартість будівництва та експлуатації залізниць, вимагають додаткових витрат щодо підвищення ресурсу та довговічності конструкцій колії, забезпечення безпеки руху. У [72, 74, 75] обґрунтовується створення шпал із полімерів і композиційних матеріалів на їх основі, доводиться, що вони позбавлені зазначених недоліків. Такі шпали успішно проходили експлуатаційні випробування, але поки не знайшли широкого застосування. Проте відомі й недоліки полімерів – старіння під впливом ультрафіолетового випромінювання, невисока теплостійкість, горючість. Істотно відрізняються від залізобетону та деревини та їх фізико-механічні властивості, особливо деформативні характеристики.

1.7 Конструкції із бетону з композитною арматурою

Оскільки невисокий електричний опір залізобетонних шпал і їх участь в колах струмів витоку та електрокорозійних процесах у великому ступені обумовлені електропровідністю сталевій арматури, її заміна неелектропровідною композитною арматурою дозволила б вирішити низку проблем експлуатації залізниць.

У [72, 74, 75] припущено, що багатьох недоліків можуть бути позбавлені бетонні шпали, армовані композитною арматурою, через її захищеність від ультрафіолетового випромінювання, високу корозійну стійкість. Заміна сталевій дрітної арматури неелектропровідною композитною арматурою дозволить підвищити електричний опір шпал навіть за умови зниження

вимог до тріщиностійкості шпал та зменшення зусилля попереднього натягу або відмови від нього.

У [76, 77] досліджується можливість використання композитної арматури для конструкцій, що згинаються. Проте розглядаються конструкції без попереднього напруження арматури, яке звичайно здійснюється у шпалах.

У [78] показано можливість попередньої напруги композитної арматури, проте допустимість зниження його зусилля або взагалі скасування попереднього напруження здається економічно привабливим. Однак неоднакові фізико-механічні властивості композитної і сталеві обумовлюють також неоднакову роботу конструкцій із бетону з ними [79], що стосовно шпал потребує додаткових досліджень.

У роботі [80] відзначається, що бетонні конструкції з композитною арматурою мають більшу пластичність, ніж аналогічні залізобетонні конструкції. Для забезпечення роботи в пружній стадії це вимагає меншого рівня навантаження конструкції, а, отже, застосування більш потужних перерізів і армування, тому авторами пропонується та досліджується комбіноване армування зі сталеві арматурою. Але для складної роботи конструкцій, наприклад на суцільній пружній основі, як шпали, таке сполучення арматури з дуже різними модулями пружності залишилось недослідженим і не здається прийнятним.

У роботі [81] показано, що показники жорсткості та тріщиностійкості бетонних конструкцій з композитною склопластикові арматурою нижче таких показників аналогічних залізобетонних конструкцій. У досліджених зразків з композитною арматурою прогин перевищував прогин зразків зі сталеві арматурою на 43,3%, ширина розкриття тріщин – на 28,8%, момент утворення тріщин був менший на 16%, а момент руйнування – на 18,1%. Тому авторами зроблено висновок про недоцільність застосування композитної арматури для балкових конструкцій, що згинаються, та рекомендовано композитну арматуру для конструкцій на суцільній пружній

основі. Але залишилось недослідженим попереднє напруження, як у шпал, композитної арматури.

У роботі [82] також відзначається менша жорсткість і тріщиностійкість бетонних конструкцій з композитною арматурою порівняно із залізобетонними, а також крихкий характер руйнування композитної арматури та конструкцій з нею. Для підвищення тріщиностійкості пропонується і досліджується підвищення міцності бетону. Оскільки шпали, особливо для безпідкладкових рейкових скріплень, виготовляють із бетону високих класів, можна припустити, що для шпал застосування композитної арматури більш придатне, ніж для більшості будівельних конструкцій.

У [83] досліджується робота балкових конструкцій із бетону з композитною арматурою під малоцикловими навантаженнями. Відмічається їх менша тріщиностійкість порівняно із залізобетонними конструкціями, для розрахунку за другою групою граничних станів, зокрема, ширини розкриття тріщин, пропонуються поправочні коефіцієнти.

В ряді робіт досліджується можливість попереднього напруження зовнішнього армування конструкцій композитними стержнями [84], смугами [85]. Зовнішнє армування не здається прийнятним для шпал, але в цих роботах показано, що порівняно зі сталевією для композитної арматури важче забезпечити анкерування. Також в цих роботах досліджено механічне анкерування арматури і не приділено уваги клейовим з'єднанням арматури з анкерними пристроями.

Отже, використання композитної арматури для залізничних шпал із бетону ускладнюється її суттєвою відміною від сталевієї арматури за пружними властивостями і залишається недостатньо дослідженим. Тому такі дослідження залишаються актуальними.

1.8 Залізничні шпали із бетону з композитною арматурою

У роботі [86] запропоновано ескізне конструктивне рішення шпал з композитною епоксидно-базальтовою арматурою $8\varnothing 8$ мм замість сталеві $44\varnothing 3$ мм. Для аналізу напружено-деформованого стану шпал використано підходи до взаємодії елементів колії і рухомого складу [87-89] роботи шпал колії. В порядку пошукових досліджень за допомогою методу скінчених елементів та програмного забезпечення ЛІРА-САПР у [86] виконано аналіз напружено-деформованого стану попередньо-напружених шпал з дротяною сталеві та базальтопластикові (епоксидною) арматурою. Показано, що шпали з композитною арматурою відповідають вимогам до міцності.

Проте скінчено-елементна модель шпали достатньо складна і для композитної арматури не була апробована. Тому виконані методом скінчених елементів розрахунки міцності, жорсткості та тріщиностійкості шпал з композитною арматурою вимагають верифікації. Отже, деформативність і тріщиностійкість таких шпал залишились недостатньо дослідженими. Причиною цього були об'єктивні труднощі, пов'язані з неможливістю провести експериментальні дослідження на шпалах в натуральну величину в достатньому обсязі. Все це дозволяє стверджувати, що доцільним є проведення експериментального дослідження міцності, жорсткості та тріщиностійкості шпал на моделях.

1.9 Робоча гіпотеза та завдання досліджень

Робоча гіпотеза дослідження: заміна у шпалах із бетону сталеві дротяної арматури композитною дозволить підвищити їх електричний опір, зменшити струми витіку та усунути електрокорозійні процеси в них, знизити вимоги до тріщиностійкості шпал та зусилля попереднього напруження арматури.

Завдання досліджень:

- виконати аналітичний огляд джерел щодо умов експлуатації та пошкоджуваності залізобетонних шпал, а також можливості заміни сталеві дотяної арматури композитною;

- розробити методику дослідження і порівняльного аналізу несучої здатності бетонних шпал з попередньо напруженою сталеві та композитною арматурою на моделях;

- розробити методики порівняльного дослідження електричних властивостей шпал із бетону зі сталеві та композитною арматурою, впливу на них постійного та пульсуючого однонаправленого електричних потенціалів та агресивних середовищ на моделях;

- виконати розрахунковий і натурний експерименти з навантаженням моделей шпал із бетону з попередньо напруженою композитною та сталеві дотяною арматурою, а також порівняльний аналіз результатів розрахункового та натурального експериментів;

- дослідити електричні властивості моделей шпал із бетону з композитною та сталеві дотяною арматурою, виконати експеримент з їх експозицією під впливом постійного та пульсуючого однонаправленого електричних потенціалів та агресивних середовищ, дослідити наслідки цих впливів та виконати їх порівняльний аналіз;

- розробити рекомендації щодо конструкції і технології виготовлення шпал із бетону зі сталеві дотяною та композитною арматурою.

Висновки за розділом 1

1. На залізницях загального користування України основними типами підрейкових основ є залізобетонні та дерев'яні шпали, а на металевих мостах – залізобетонні плити безбаластного мостового полотна та дерев'яні мостові бруси 96 % всіх шпал – залізобетонні (від 56 % у під'їзних коліях до 100 % у головних коліях). Залізобетонні шпали порівняно з дерев'яними мають більший ресурс, у т.ч. через більш досконалу систему утримання та ремонту

колії на них (більш високих категорій) та її фінансування. Проте значна абсолютна кількість несправних залізобетонних шпал в коліях мережі залізниць загального користування – понад 180 тис. шт. та тенденція збільшення цієї кількості робить підвищення ресурсу шпал із бетону актуальним завданням.

2. Найбільш характерною і масовою конструкцією залізниць є колія на залізобетонних шпалах довжиною 2700 мм з епюрою 1840 шт./км з рейками Р65 переважно з клемно-болтовими проміжним рейковими скріпленнями (69,2 %) та значною часткою пружних анкерних скріплень (19,4 %), розрахована на осьове навантаження 245 кН (25 тс).

3. Залізобетонні шпали виготовляють попередньо напруженими з бетону класу не менше С32/40, марки з морозостійкості F200 та водонепроникності W6, армованими високоміцним дротом із вуглецевої сталі 44Ø3 мм, натяг якої із зусиллям 358 кН здійснюється на форму і передається на бетон після досягнення ним передаточної міцності не менше 32 МПа. На торцях шпал залишаються допущені чинними нормами випуски арматури, що призводить до участі арматури в колах струмів витоку та, відповідно, збільшенню втрат тягових струмів, створенню умов для електрокорозії.

4. Всі передбачені чинним нормами пошкодження (дефекти) залізобетонних шпал є механічними – тріщинами, відколами тощо. Проте у шпалах утворюються і корозійні пошкодження, у т.ч. у вигляді сітки тріщин через внутрішню корозію бетону від взаємодії реакційно-здатних заповнювачів з лугами цементу (Alkali-Silica-Reaction – ASR). Внутрішня корозія від ASR в різному ступені впливає на виникнення і розвиток до 65 % пошкоджень, відомих як механічні.

5. На електрифікованих ділянках залізниць під впливом постійного або однонаправленого пульсуючого електричного потенціалу утворюються струми витоку та відбувається електрокорозія сталеві арматури, а також бетону, яка полягає у багатократній інтенсифікації відомих видів корозії, залежних від процесів перенесення іонів – вилуговування, внутрішньої

корозії від ASR. Електричні потенціали прискорюють вилугування за рахунок перенесення іонів та призводять до утворення градієнтів властивостей бетону в конструкціях.

6. Оскільки невисокий електричний опір залізобетонних шпал і їх участь в колах струмів витоку та електрокорозійних процесах у великому ступені обумовлені електропровідністю сталеві арматури, її заміна неелектропровідною композитною арматурою дозволила б вирішити низку проблем експлуатації залізниць. Проте використання композитної арматури для залізничних шпал із бетону ускладнюється її суттєвою відміною від сталеві арматури за пружними властивостями і залишається недостатньо дослідженим.

7. Існує ескізне конструктивне рішення шпал з композитною епоксидно-базальтовою арматурою для вітчизняних конструкції і технології виготовлення залізобетонних шпал, обґрунтоване розрахунками напружено-деформованого стану методом скінчених елементів. Проте скінчено-елементна модель шпали достатньо складна і для композитної арматури не була апробована. Тому виконані у складі пошукового дослідження методом скінчених елементів розрахунки міцності, жорсткості та тріщиностійкості шпал з композитною арматурою вимагають верифікації, отже, їх деформативність і тріщиностійкість залишились недостатньо дослідженими.

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Методи порівняльного дослідження напружено-деформованого стану шпал із бетону з попередньо-напруженою сталевую дротяною та композитною арматурою на моделях

Для верифікації результатів розрахунків жорсткості, тріщиностійкості, міцності шпал з базальтопластиковою арматурою проведено дослідження на моделях із бетону з такою, а також дротяною сталевую арматурою. Дослідження містили розрахунковий і натурний експерименти з порівнянням їхніх результатів і проведені спільно з Ельшадом Наджафовим, який використав їх результати для розрахунків міцності, жорсткості та тріщиностійкості конічних бетонних стояків залізничної контактної мережі, з композитним армуванням [90, 91].

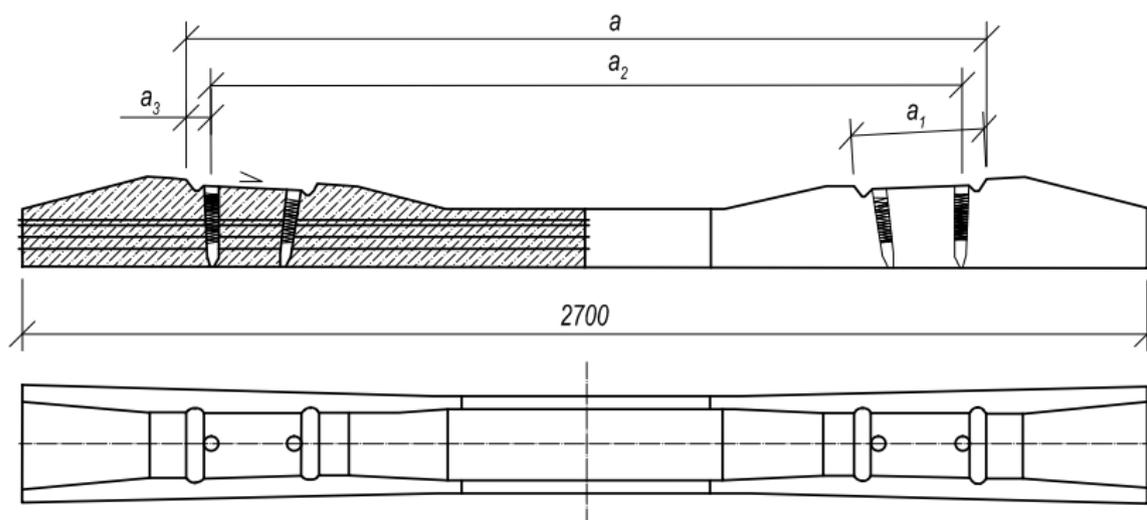
2.1.1 Моделі шпал і схема їхнього навантаження

Досліджували скінчено-елементні та фізичні моделі залізничних шпал із сталевую та композитною попередньо напруженою арматурою.

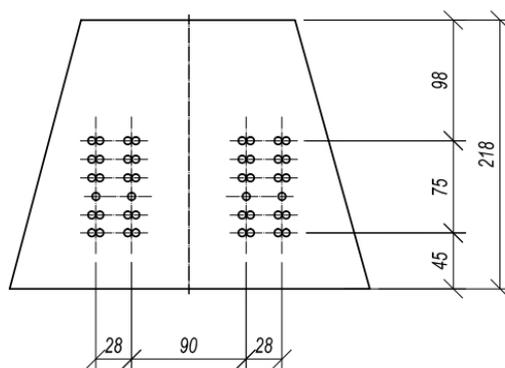
Припущено, що напружено-деформований стан фізичної моделі шпали у вигляді бетонної армованої балки з попередньо напруженою в стиснутій і розтягнутій зонах арматурою відповідає напружено-деформованому стану шпали під час стандартного випробування.

Прийняті в дослідженні спрощення: бетонна балка з попередньо напруженою арматурою в стиснутій і розтягнутій зонах, завантажена центральною зосередженою силою, моделює роботу шпали в підрейковому і середньому перерізі під час стандартного випробування.

a)



б)



в)

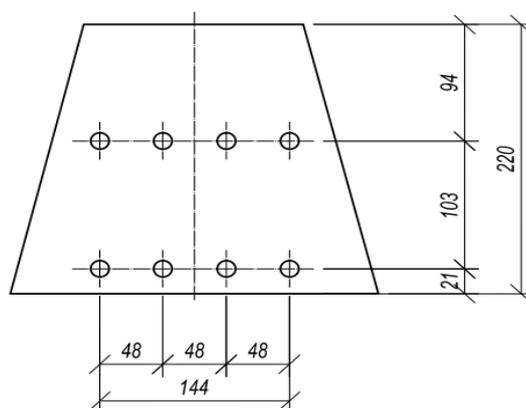


Рис. 2.1 – Попередньо напружені шпали для шурупно-дубельного скріплення: *a* – загальний вигляд; *б*, *в* – підрейкові перерізи шпал зі сталевую дротяною (*б*) і композитною (*в*) арматурою

a)



б)

в)

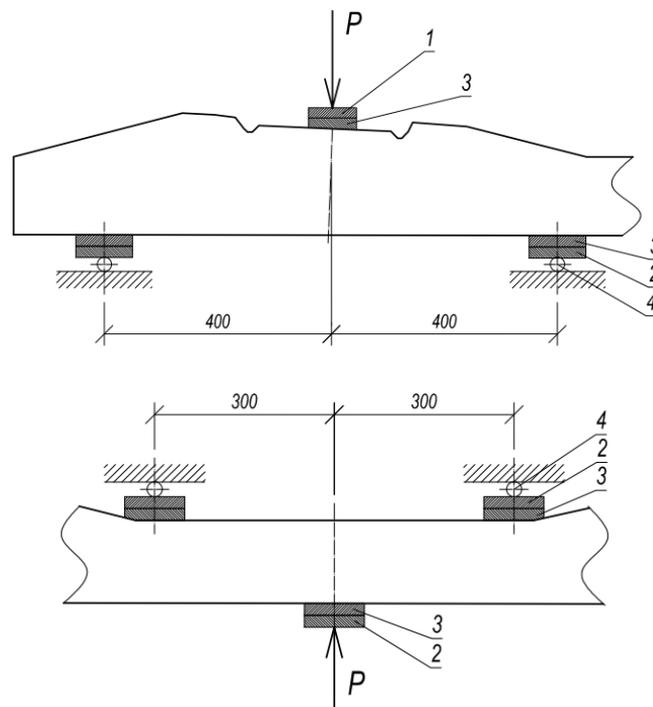


Рис. 2.2 – Випробування шпал на тріщиностійкість: *a* – випробувальний прес Diósgyöri Gérgyár VIZS PRES (Угорщина) зі шпалою; *б*, *в* – схеми випробувань в перерізах підрейковому (*б*) і середньому (*в*); 1, 2 – підкладка із сталі; 3 – прокладка із гуми; 4 – циліндричний шарнір із сталі

Конструкцію попередньо-напруженої шпали із бетону з дотяною сталеву сталеву $44\varnothing 3$ мм і композитною епоксидно-базальтовою $8\varnothing 8$ мм арматурою представлено на рис. 2.1. Згідно ДСТУ Б.В.2.6-209 (український аналог EN 13230-2) шпали мають випробуватись на тріщиностійкість за схемою рис. 2.2 без навантаження до руйнування. Контрольні зусилля осьових навантажень, за яких розкриття тріщин не повинна бути більшою 0,05 мм, а довжина 30 мм, складають для середнього перерізу 98 кН, а для середнього – 130 кН. Таким зусиллям відповідають згинальні моменти 29,4 і 52 кН.

Повномірні шпали є дуже складними для виготовлення та випробувань в умовах лабораторії. Тому для випробувань з метою верифікації результатів їх розрахунків з визначенням жорсткості, тріщиностійкості, міцності передбачене дослідження на спрощених моделях. Моделі є призмами із бетону розміром $560 \times 100 \times 50$ мм. Арматура розташована пакетом у вигляді двох пучків сталеву дроту або двох окремих композитних стержнів в розтягнутій та стиснутій зонах, як вказано на рис. 2.3. Попереднє напруження здійснене усього пакету арматури, як і у шпалі (рис. 2.1). Схема навантаження (рис. 2.2) – центральне зосереджене на обперту по двох кінцях балку.

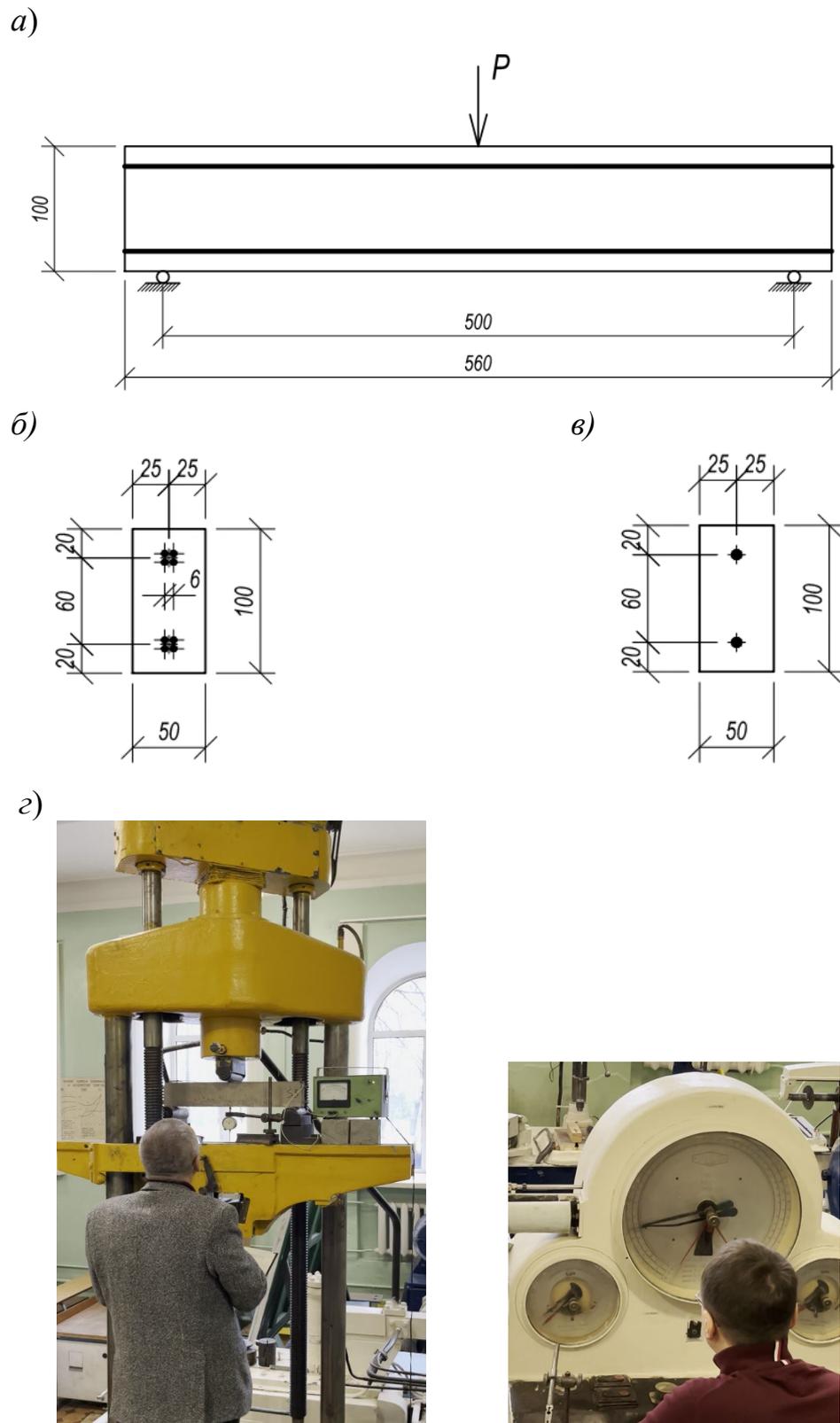


Рис. 2.3 – Випробування моделей навантаженням: *а* – схема моделі та її навантаження; *б* – поперечний переріз моделі зі сталеву дрютною арматурою; *в* – те ж саме з композитною арматурою; *г* – випробування за допомогою універсальної випробувальної машини МУП-50 з вимірюванням деформацій індикатором ІЧ-10 на штативі

2.1.2 Дослідження фізико-механічних властивостей арматури

Для виготовлення моделей застосовували:

- арматурний дріт періодичного профілю із високовуглецевої сталі Вр1400Ø3 мм (рис. 2.4, а);
- композитну арматуру із склеєного епоксидним полімером базальтового волокна діаметром Ø8 мм згідно з ДСТУ Б В.2.7-312:2016 [92] (рис. 2.4, б) торгівельної марки Технобазальт [93].

Перед виготовленням моделей досліджено деформативні властивості та показники міцності композитної і сталеві дротяної арматури. Випробування здійснювали на розривній машині Р-50.

Сталеву дротяну арматуру у захватах машини затискали безпосередньо (рис. 2.5).

Для затискання композитної арматури на кінці її зразків наклеювали сталеві трубки з попередньо вздовж розрізаним та сплющеним кінцем (рис. 2.6).

Для вимірювання подовження арматури на її стержень (дротину) задалегідь наносили мітки та по мірі навантаження вимірювали відстань між ними. Випробування сталеві дротяної арматури показано на рис. 2.5, композитної арматури – на рис. 2.7. Навантаження здійснювали ступенями. По мірі його збільшення вимірювали довжину стержня за допомогою лічильника машини та вимірювання відстані між мітками електронним штангенциркулем. Навантаження здійснювали до руйнування (рис. 2.5, в і 2.7, в). За результатами досліджень будували діаграми деформування арматури $\sigma = f(\varepsilon)$ – залежності «відносна деформація ε – напруження σ ». Результати дослідження узагальнено на рис. 2.8 і в табл. 2.1.

a)



б)



Рис. 2.4 – Арматура для армування моделей шпал: *a* – високоміцний дрiт $\varnothing 3$ мм Вр1400 для армування попередньо напружених конструкцій; *б* – композитна епоксидно-базальтова арматура діаметром $\varnothing 8$ мм

а)



б)



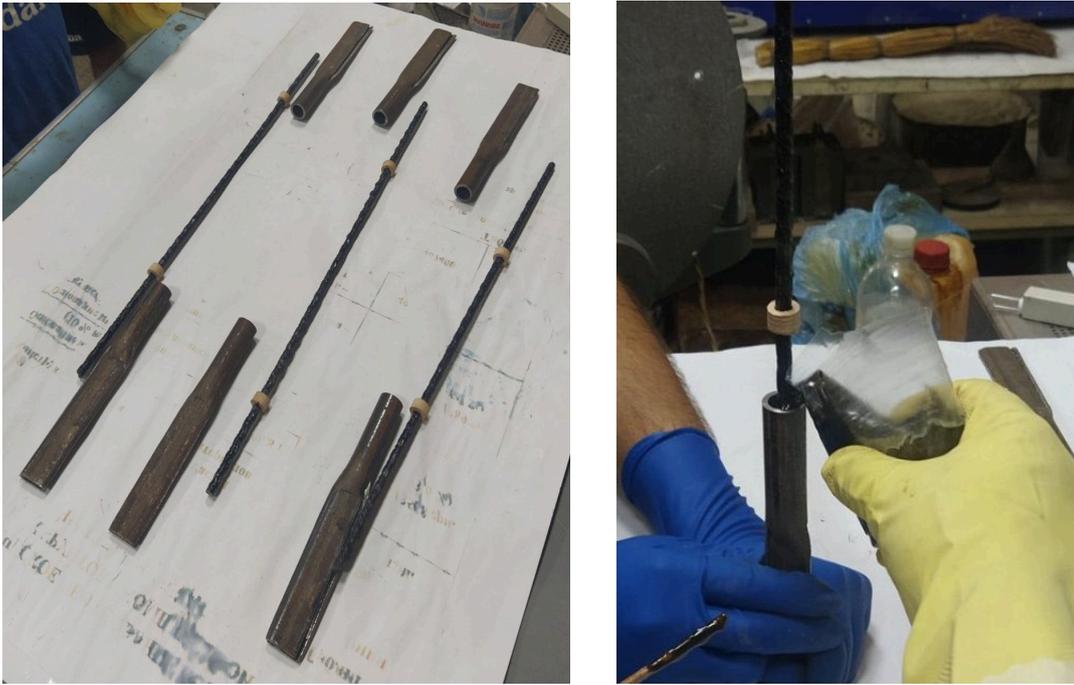
в)



Рис. 2.5 – Випробування дроту $\varnothing 3$ мм Вр1400: а – розривна машина Р-50 зі зразком; б – зразок дроту перед початком навантаження; в – зразок дроту після розриву

а)

б)



в)



Рис. 2.6 – Підготування зразків композитної арматури для випробування на розривній машині: *а* – зразки арматурних стержнів і сталеві трубки зі сплющеними кінцями; *б* – встановлення трубок на кінці стержнів і заливання в зазор між ними епоксидної композиції; *в* – готові до випробування зразки

а)



б)



в)



Рис. 2.7 – Випробування епоксидно-базальтової арматури: *а* – розривна машина Р-50 з арматурним стержнем; *б* – стержень перед початком навантаження; *в* – початок руйнування зразка з обриванням крайніх пучків

ВОЛОКОН

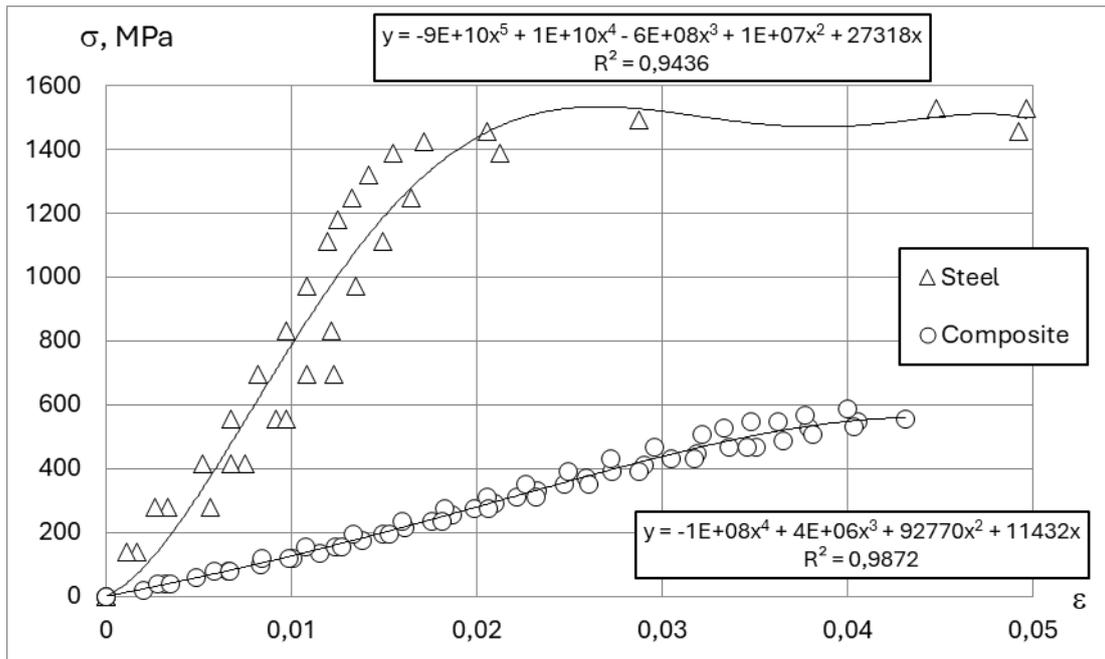


Рис. 2.8 – Діаграми деформування (залежність між напруженням σ та відносною деформацією ϵ) епоксидно-базальтлвлі арматури та сталевго дроту

Таблиця 2.1 – Модуль пружності та границя міцності на розтяг сталевго дроту та базальтопластикової арматури

Показник	Один. вимір.	Арматура	
		Високоміцний дріт Вр1400	Базальто-пластикова
Модуль пружності E	МПа	81301	14981
Границя міцності на розтяг f	«	1400	540

Отримані діаграми (рис. 2.8) добре апроксимуються поліномами: сталевго дроту – 5 ступеня (з коефіцієнтом кореляції 0,97), композитної епоксидно-базальтової – 4 ступеня (з коефіцієнтом кореляції 0,99), що свідчить про їхню достовірність.

Але із рис. 2.8 видно, що до напруження 1400 МПа діаграма деформування сталевго дроту близька до лінійної, деформація на лінійній стадії є пружною. По досягненню напруження 1400 МПа спостерігається

розвинута площадка текучості, яка завершується руйнуванням. Діаграма деформування композитної епоксидно-базальтової арматури до напруження 540 МПа також близька до лінійної, деформація є пружною. По досягненню напруження 540 МПа спостерігається дуже коротка ледь помітна площадка текучості, яка завершується руйнуванням, яке, відповідно, є майже крихким.

Визначені за діаграмами деформування як тангенс кута їх нахилу на лінійній стадії величини модуля пружності E склали: сталевому дроту – 81300 МПа, композитної епоксидно-базальтової арматури – 14980 МПа. Границя текучості (міцності на розтяг) f арматури склали: сталевому дроту – 1400 МПа, композитної арматури – 540 МПа.

2.1.3 Визначення зчеплення арматури з бетоном

Для коректних розрахунків напружено-деформованого стану шпал і моделей із бетону зі сталевую дротяною та композитною арматурою експериментально досліджено зчеплення зазначених видів арматури з бетоном. Дослідження виконано на моделях, що імітували розташування арматурного стержня в масиві бетону. Зчеплення руйнували «проштовхуванням» арматурного стержня. Кількість зразків кожної моделі – 3. Схему моделей та їх випробування наведено на рис. 2.9.

Моделі формували із розчинової частини бетону у незнімних обичайках. Обичайки нарізали із поліпропіленової труби діаметром 50 мм довжиною 50 мм (рис. 2.9, а, 2.10, а).

Розчинову складову бетону виготовляли із матеріалів:

- цемент загальнобудівельного призначення ПЦ П/А-К-500 (СЕМ П/А-LL 42,5R) виробництва ІFCЕМ (Івано-Франківського цементного заводу);
- пісок природний кварцовий Безлюдівського родовища (Харківська обл.) з модулем крупності $M_{кр} = 1,1$;
- вода водопровідна.

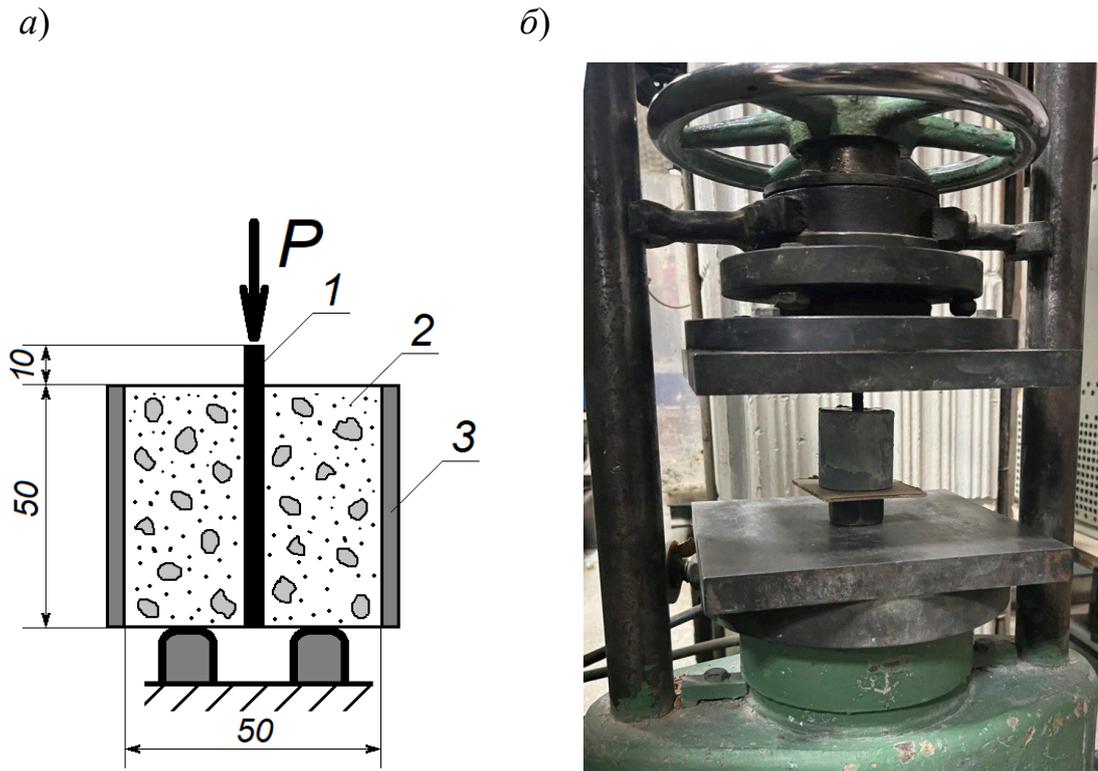


Рис. 2.9 – Визначення зчеплення сталевій дротяної та композитної арматури з бетоном: *а* – конструкція моделі та схема випробування; *б* – випробування моделі; 1 – стержень базазальтопластикової арматури або сталеві дротина; 2 – бетон (розчинові частина); 3 – незнімна обичайка

Склад розчинової частини бетону (табл. 2.2), зокрема, співвідношення витрати цементу і дрібного заповнювача прийняли відповідним складу бетону моделей шпал, наведеному у табл. 2.7 (водоцементне відношення В/Ц = 0,4 уточнено по ходу експерименту до потрібної легкоукладальності): П:Ц:В = 1,12:1:0,4.

Таблиця 2.2 – Склад бетону (розчинової частини) моделей для дослідження зчеплення сталевій дротяної і композитної арматури з бетоном

Компонент	Відносний вміст	Витрата на заміс (6 моделей), кг
Пісок П	1,12	1
Портландцемент Ц	1	0,893
Вода В	0,4	0,36

а)



б)



в)



Рис. 2.10 – Виготовлення моделей для визначення зчеплення сталевій дотяної та композитної арматури з бетоном: *а* – заготовлені стержні та обичайки; *б* – свіжовідформовані моделі; *в* – затверділі готові до випробування моделі

Із сталевій дотяної та композитної арматури нарізали стержні довжиною 60 мм, обрізаючи їхні торці суворо перпендикулярно. Діаметр стержнів вимірювали електронним штангенциркулем.

Під час формування кожної моделі обичайку встановлювали на стандартну лабораторну віброплощадку (частота 50 Гц, амплітуда 0,15-0,2 мм), в обичайку співвісно з нею встановлювали стержень і заповнювали розчиноюю сумішшю, ущільнюючи її вібрацією і притримуючи арматуру у співвісному положенні (рис. 2.10, б). Твердіння моделей забезпечували

тепловологісною обробкою в лабораторній пропарювальній камері за температури ізотермічної витримки 60°C, тривалості 6 год.

Моделі випробували одразу після остигання, що відповідає мінімальному строку передавання попереднього натягу арматури у виробничих умовах. Для випробування модель встановлювали на нижню плиту гідравлічного преса через кільцеву опору-підставку (рис. 2.9). Під час випробування здійснювали натискання безпосередньо верхньою плитою преса на виступаючу частину стержня до його продавлювання, фіксуючи руйнівну силу F , кгс, за якої воно відбулось (рис. 2.10, б).

Зчеплення бетону з арматурою p визначали як контактне дотичне напруження, за якого спостерігалось просування арматури:

$$p = 1000P / l\pi d, \text{ кгс/см}^2; \quad (2.1)$$

де l – довжина частини стержня у розчині моделі, мм; d – діаметр стержня, мм.

Величину зчеплення приймали як середнє арифметичне трьох результатів випробування.

Результати випробувань представлено у табл. 2.3.

Таблиця 2.3 – Результати випробування моделей з визначення зчеплення бетону з базальтопластиковою арматурою та сталевим дротом

Арматура	Довжина l , мм	Діаметр d , мм	№	Руйнівна сила		Зчеплення з бетоном p , МПа		p_k/p_c
				F , кгс	$P = 0,00981F$, кН	p_i	p	
Дротяна Вр1400	50	3	C1	400	3,92	8,33	9,23	0,69
			C2	420		8,74		
			C3	510		10,62		
Базальто- пластикова		0,74	K1	760		6,41	6,33	
			K2	750		6,33		
			K3	740		6,25		

Як бачимо із табл. 2.3, зчеплення базальтопластикової арматури з бетоном складає 6,33 МПа, сталевій дрітязній – 9,23 МПа. Отже, зчеплення базальтопластикової арматури з бетоном на 31 % менше, ніж сталевий дріт, що відповідає частці від нього 0,69.

2.1.4 Виготовлення моделей

Моделі виготовляли у силових формах з реалізованою можливістю попереднього натягу арматури (рис. 2.12, а). Зазначені форми переобладнували із сталевих форм для виготовлення із бетону балок $560 \times 100 \times 50$ мм, наведених на рис. 2.11 і 2.12.

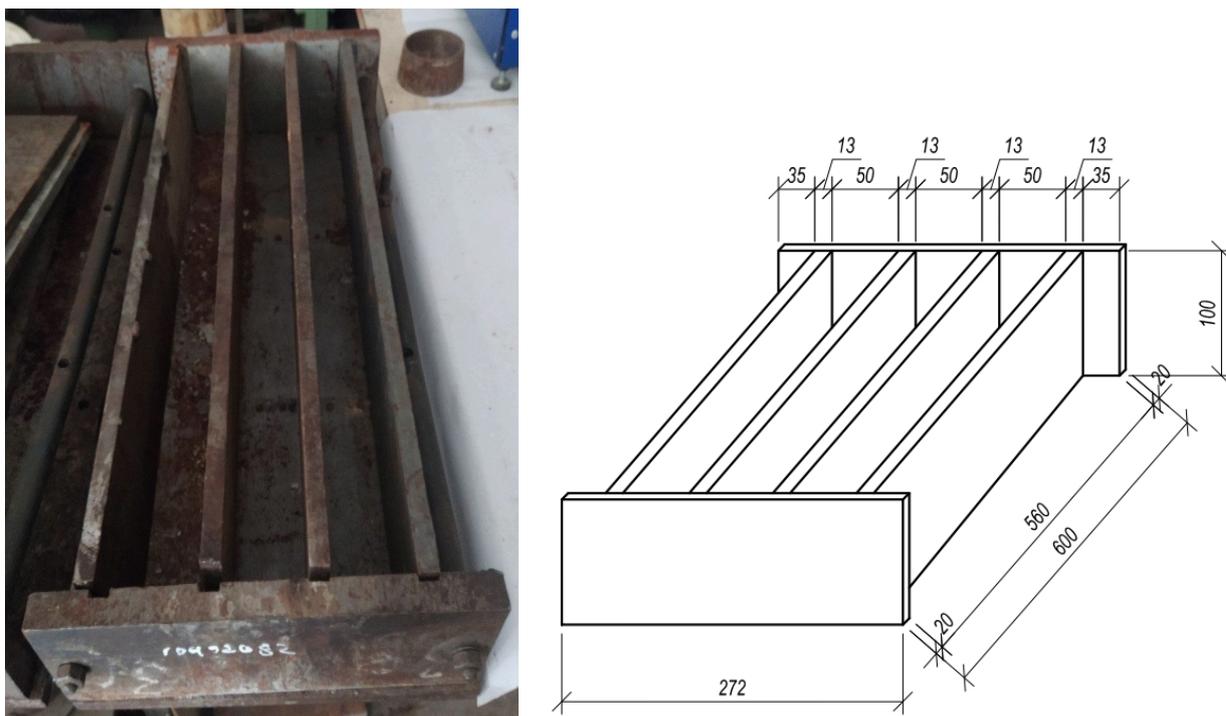


Рис. 2.11 – Сталева форма для виготовлення бадок із бетону

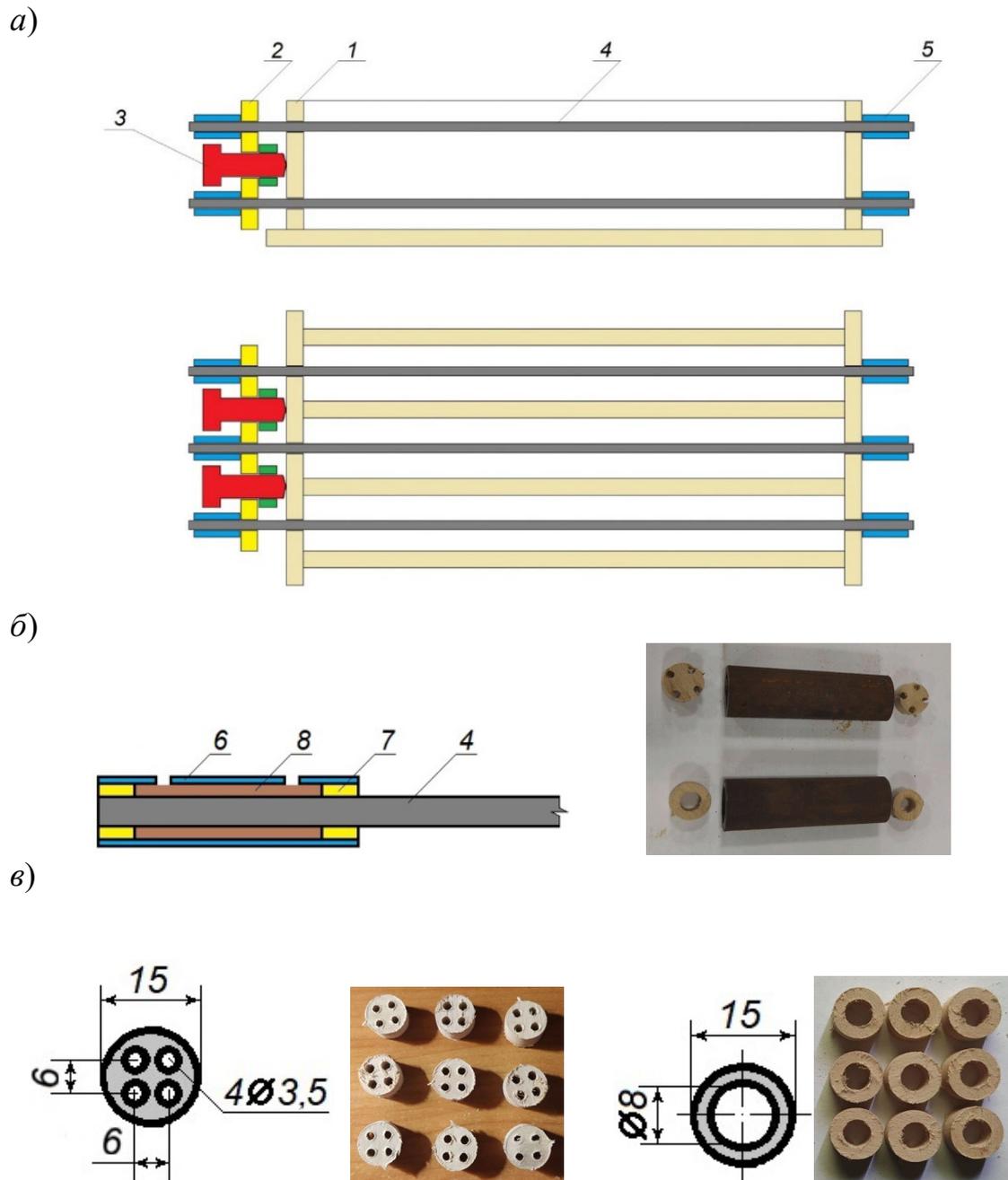


Рис. 2.12 – Переобладнання розбірної форми для звичайних балок у силову форму для попередньо напружених балок $560 \times 100 \times 50$ мм: *а* – схема форми; *б* – наклеювана на арматуру циліндрична упорна шайба; *в* – фіксатор положення пучка сталевого дроту $4\varnothing 3$ мм у вигляді заглушки з отворами; *г* – те ж саме для базальтопластикового стержня $\varnothing 8$ мм; 1 – збірна форма; 2 – натяжна пластина; 3 – натяжний болт з гайкою; 4 – пучки дроту або базальтопластикові стержні; 5 – наклеєні на арматуру упорні циліндричні шайби; 6 – трубка із сталі внутрішнім діаметром 15 мм, товщиною стінки 2 мм довжиною 70 мм з отворами; 7 – фіксатор положення арматури із 10-міліметрової фанери у вигляді заглушки з отворами; 8 – епоксидна композиція

Форму 1, рис. 2.12 обладнували планкою натяжною 2 і болтами натяжними з гайками 3, за допомогою яких здійснюється попередній натяг арматури 4 через наклеєні на неї шайби упорні циліндричні 5 (рис. 2.12, б). Анкерування арматури за задні стінки також здійснювали за допомогою наклеюваних циліндричних упорних шайб (рис. 2.12, б).

У стінках форми – як передній, так і задній (рис. 2.13) свердлили отвори $\varnothing 9$ мм, по 6 шт. в кожній, для пропуску стержня $\varnothing 8$ мм базальтопластикової арматури або пучка $4\varnothing 3$ мм сталевих дроту. У передній стінці (рис. 2.13, а) свердлили заглиблення конічної форми для направлення болтів натяжних.

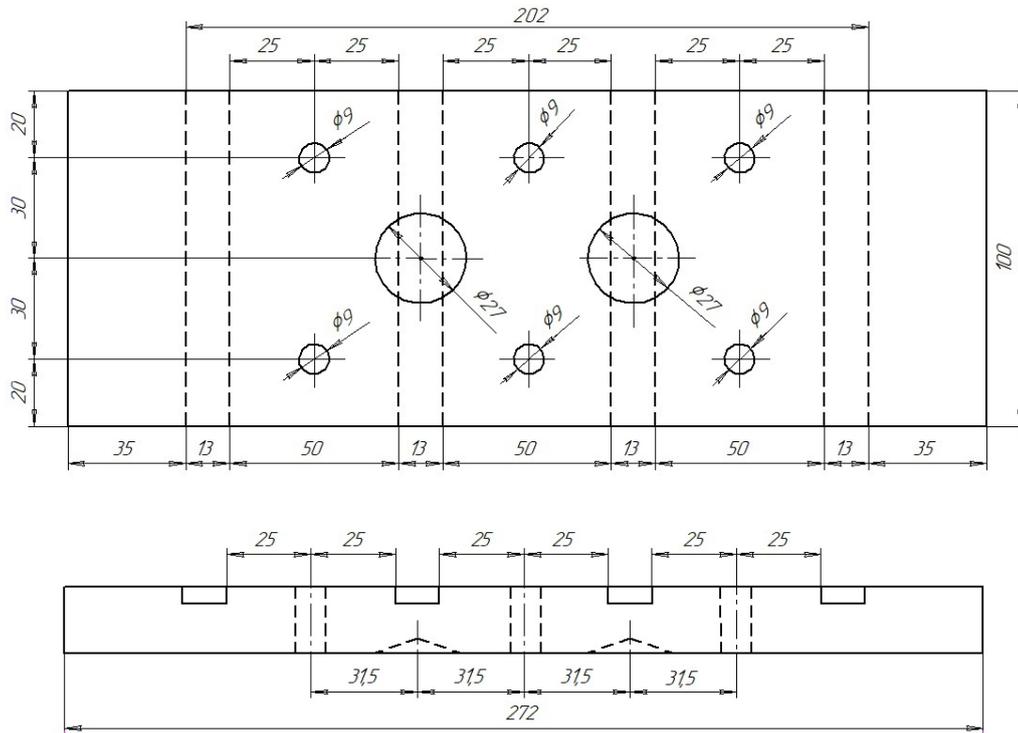
Форми оснащували планкою натяжною сталевих (рис. 2.14) з товщини 20 мм, у якій свердлили отвори $\varnothing 9$ мм по 6 шт. для пропускання стержня $\varnothing 8$ мм базальтопластикової арматури або пучка $4\varnothing 3$ мм сталевих дроту, та два отвори $\varnothing 27$ мм для болтів високоміцних натяжних $\varnothing 26$ мм (рис. 2.15).

Переобладнання зазнали форми в кількості 2 шт., для яких заготовляли:

- стінки передні – 2 шт.;
- стінки задні – 2 шт.;
- пластини натяжні – 2 шт.;
- болти високоміцні з гайками М26 – 4 шт.

Готова зібрана форма наведена на рис. 2.16.

а)



б)

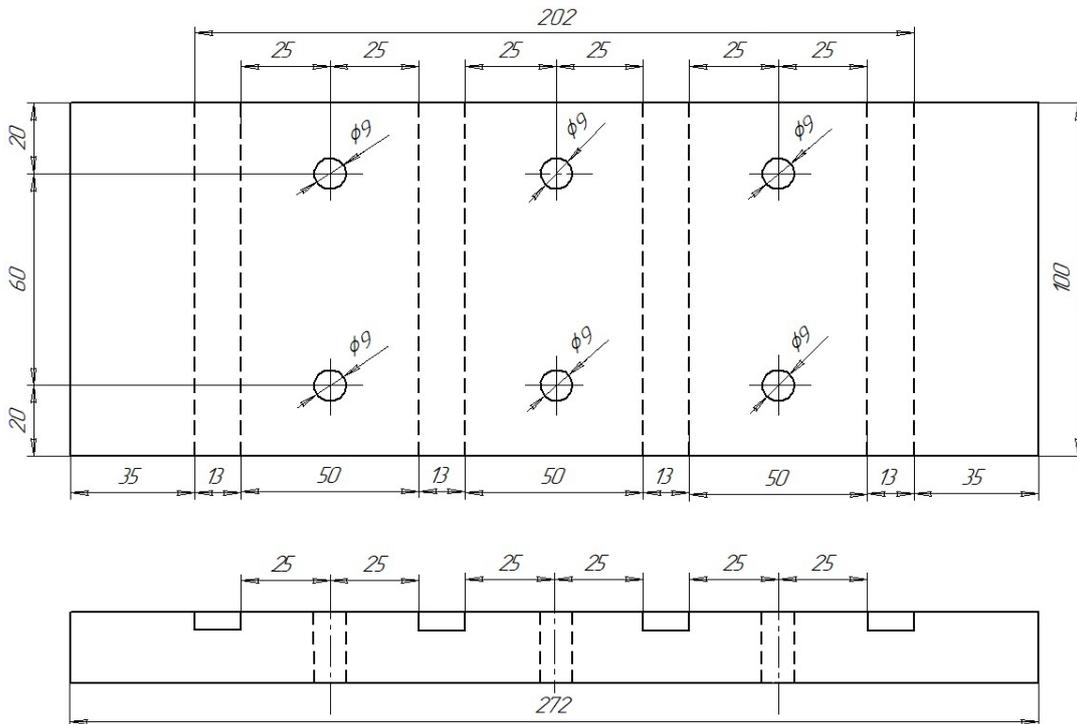


Рис. 2.13 – Стінки форми для виготовлення поперечно напружених моделей зі сталеву дрютяноу та базальтопластиковоу арматуроу: а – передня; б –

задня

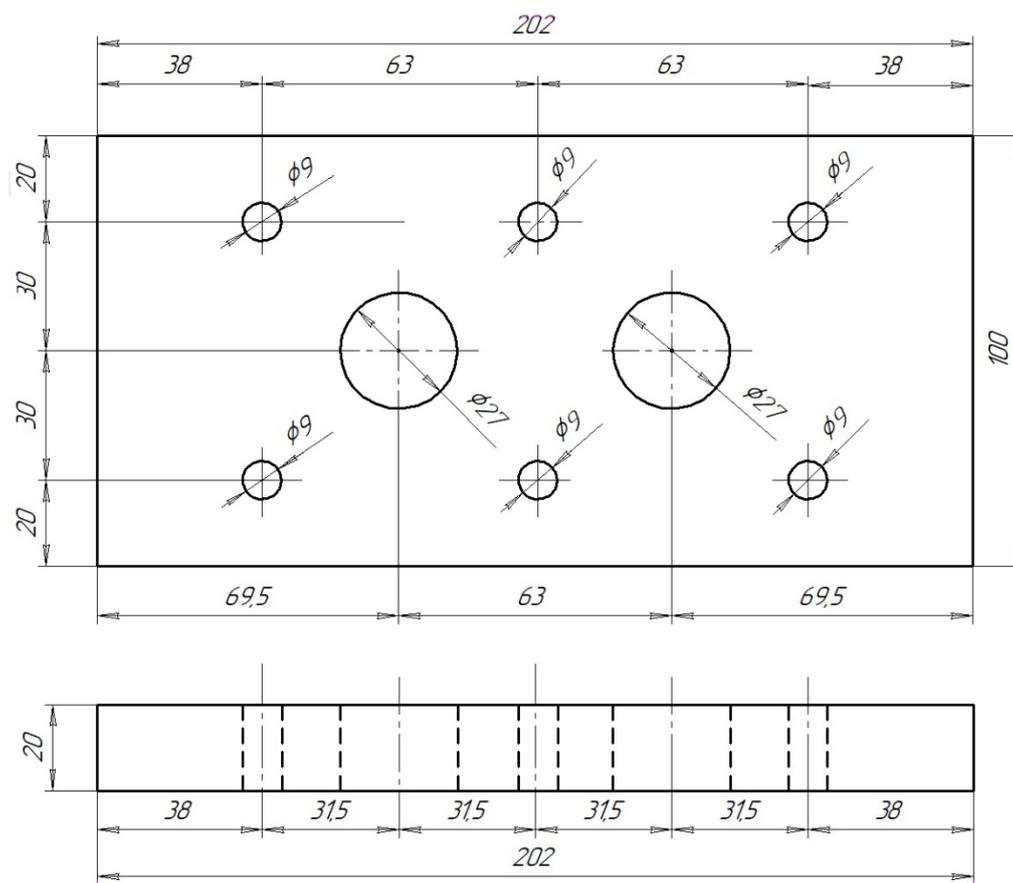


Рис. 2.14 – Натяжна планка для попереднього напруження арматури

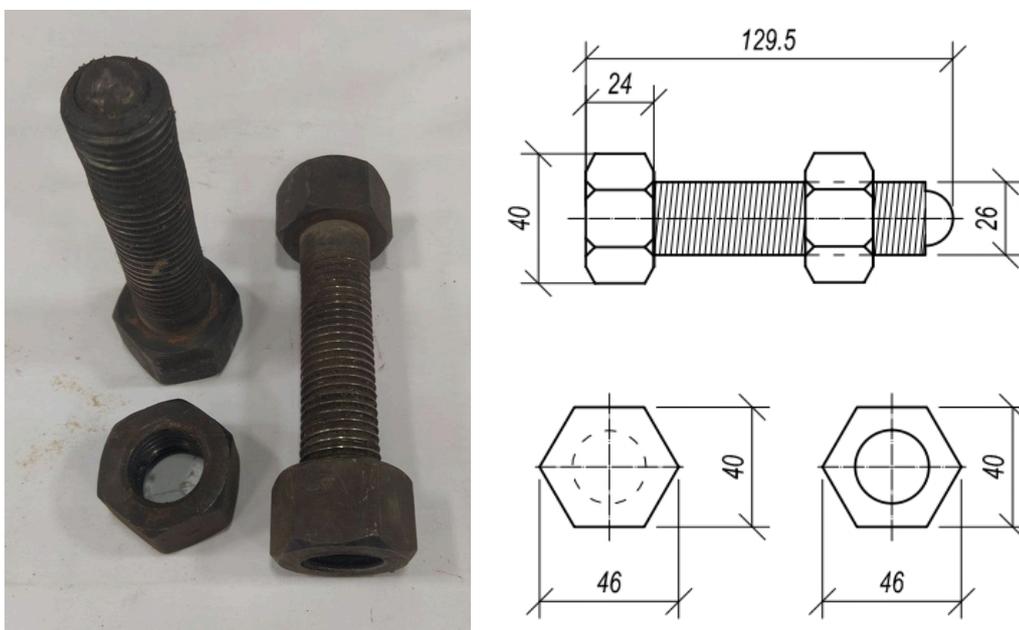


Рис. 2.15 – Високоміцні бовти з гайками для натягування арматури

а)



б)



в)



Рис. 2.16 – Форма для виготовлення моделей поперечно напружених бетонних шпал з дотягнутою сталевую та базальтопластиковою арматурою: *а* – порожня оснащена форма; *б* – оснащена форма з базальтопластиковою арматурою до її натягу; *в* – форма з максимальним натягом арматури

Натяг N_{mod} усього пакету арматури в моделях намагались прийняти відповідним напруженням від проектного натягу арматури в шпалі $N_{sl} = 358$ кН. Для цього натяг усього пакету арматури повинен бути пропорційним площі або кількості стержнів: $N_{mod} = N_{sl} \cdot 8/44 = 65,1$ кН, де 8 і 44 – кількість сталевих дротин в моделі та шпалі, відповідно. Натяг арматурного пакету моделі з базальтопластиковою арматурою повинен був бути саме таким же. Натяг арматури намагались здійснювати зусиллям 100, 75, 50 і 25 % від проектного натягу арматури в шпалі. Перерахунок зусиль натягу арматури моделі та відповідного йому подовження арматури наведено у табл. 2.4. Із табл. 2.4 видно, що натяг базальтопластикової арматури на 100 % без збільшення її перерізу неможливий через перевищення її границі міцності. Натяг арматури в моделях був обмежений також і наявними засобами.

Підготовлені для натягу стержні або пучки арматури просували крізь отвори у формі, одягали на їх кінці циліндричні упорні шайби (рис. 2.12, б) з заглушками (рис. 2.12, в) та ін'єктували у зазор між шайбою та арматурою через отвори у шайбі епоксидну композицію – спочатку у нижньому, потім – у верхньому рядк арматури (рис. 2.17). Оснащені для натягу арматури форми представлені на рис. 2.18, 2.19.

Натяг здійснювали через одну добу після наклеювання шайб за допомогою болтів натяжних і ключа торцевого (рис. 2.20). Зусилля натягу контролювали вимірюванням збільшення відстані між стінкою форми і пластиною натяжною. Зазначену відстань під час натягування вимірювали електронним штангенциркулем у чотирьох точках.

Під час натягування форми з базальтопластиковими стержнями спостерігалось руйнування різьби одного з натяжних болтів. Для забезпечення рівномірного натягу стержнів у двох моделях одним болтом стержні у третій моделі обрізали й залишили нанатягнутими.

Таблиця 2.4 – Розрахунок попереднього напруження та подовження арматури в шпалі та моделі

Арматура	Діаметр		Площа перерізу стержня		Кількість стержнів		Площа перерізу				Натягіння пакету, кН							
	мм	м	мм ²	м ²	у шпалі	у моделі	у шпалі		у моделі		у шпалі				у моделі			
							мм ²	м ²	мм ²	м ²	100%	75%	50%	25%	100%	75%	50%	25%
Вр1400	3	0,003	7,068583	7,07×10 ⁻⁶	44	8	311,0177	0,000311	56,54867	5,65×10 ⁻⁶	358	268,5	179	89,5	65,1	48,8	32,5	16,3
Базальто-пластикова	8	0,008	50,26548	5,03×10 ⁻⁶	8	2	402,1239	0,000402	100,531	0,000101								

Арматура	<i>f</i>		<i>E</i>		Напруження в арматурі, кПа							
	МПа	кПа	МПа	кПа	шпалі				моделі			
					100%	75%	50%	25%	100%	75%	50%	25%
Вр1400	1400	1400000	81301	81301000	1151060	863295	575530	287765	1151060	863295	575530	287765
Базальто-пластикова	540	<u>540000</u>	14981	14981000	890273	667705	445136	222568	<u>647471</u>	485603	323736	161868

Арматура	Відносне подовження арматури моделі від натягу				База, мм	Абсолютне подовження арматури моделі від натягу, мм			
	100%	75%	50%	25%		100%	75%	50%	25%
Вр1400	0,0142	0,0106	0,0071	0,0035	640,5	9,07	6,80	4,53	2,27
Базальто-пластикова	0,0432	0,0324	0,0216	0,0108	646,25	<u>27,93</u>	20,95	13,97	6,98

а)



б)



Рис. 2.17 – Закріплення упорних шайб на арматурі із заповненням зазору епоксидною композицією: *а* – на нижніх стержнях (пучках); *б* – на верхніх стержнях (пучках)

а)



б)



в)



Рис. 2.18 – Форма, оснащена для натягу дротяної сталевї арматури: *а* – зі сторони передньої стінки з натяжним пристосуванням; *б* – зазор між стінкою форми і натяжною планкою; *в* – зі сторони задньої стінки

а)



б)



в)



Рис. 2.19 – Форма, оснащена для натягу базальтопластикової арматури: *а* – зі сторони передньої стінки з натяжним пристосуванням; *б* – зазор між стінкою форми і натяжною планкою; *в* – зі сторони задньої стінки

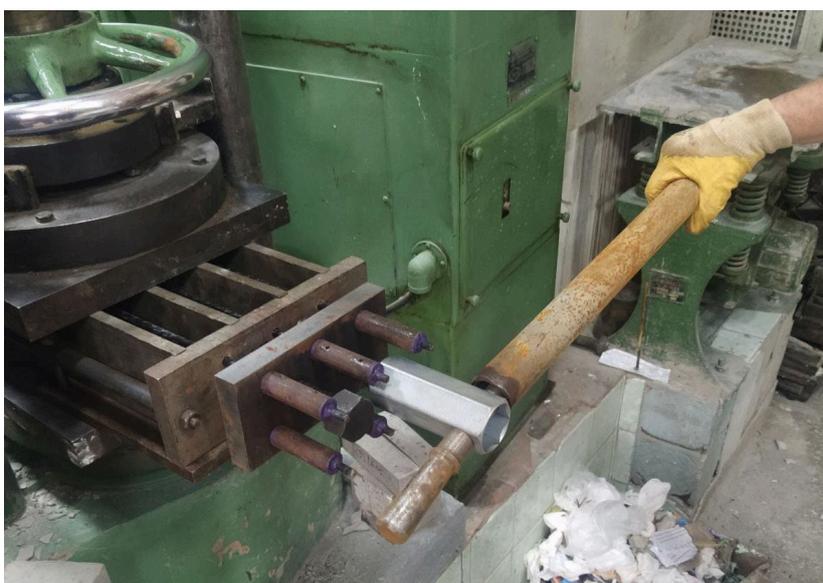


Рис. 2.20 – Натягування арматури торцевим ключем

Результати вимірювання подовження арматури під час натягу представлені в табл. 2.5. Із табл. 2.5 видно, що досягнуто натяг арматури у трьох моделей зі сталевим дротом – на 45 %, у двох моделей з базальтопластиковою арматурою – на 34,8 %, ще одна модель з базальтопластиковою арматурою залишилась без натягу. Отримані величини натягу для моделей зі сталеву дрютяною арматурою (S1, S2, S3) і композитною епоксидно-базальтовою арматурою (S1, S2, S3) узагальнені у табл. 2.6.

Таблиця 2.5 – Результати вимірювання подовження арматури та розрахунку її натягу

Арматура	Контрольний розмір, мм					Подовження		Напруження		Натяг	
	1	2	3	4	сер.	абсолютне, мм	відносне	МПа	кПа	кН	%
Вр1400 Вр1400	44,7	46,3	53,2	53,2	49,4	0	0	0	0	0	0
	49,6	49,2	56,1	56,5	52,9	3,5	0,0055	444,3	444268	25,1	38,6
	50,6	48,8	56,3	58	53,4	4,1	0,0064	517,3	517255	29,3	44,9
Базальто- пластико ва	58,5	63,5	66,5	61,9	62,6	0	0	0	0	0	0
	71,6	75,6	68,7	65,2	70,3	7,7	0,0119	177,9	177917	17,9	27,5
	73,9	77,3	69,1	65,9	71,6	9,0	0,0138	207,5	207474	20,9	32,0
	75,4	78,5	69,1	66,3	72,3	9,7	0,0150	225,4	225439	22,7	34,8

Таблиця 2.6 – Попереднє напруження арматури в моделях

Моделі з арматурою	№ зразків	База l, мм	Подовження		Модуль пружності E, МПа	Напруження $\sigma = E\varepsilon$, МПа	Площа арматури в моделі A_s , мм ²	Натяг пакету	
			абсолютне Δl , мм	відносне $\varepsilon = \Delta l/l$				$N_{mod} = \sigma A_s$, кН	% від проектного
Вр1400	S1, S2, S3	640,5	4,1	0,0064	81301	517	56,55	29,3	45
Базальто-пластиковва	C2	62,6	0	0	14981	0	100,53	0	0
	C1, C3	646,25	9,7	0,0150		225		22,7	35

Моделі формували із бетону складу, наведеного у табл. 2.7. Склад бетону визначали із застосуванням підходів, використаних у [94]. Під час

формування в моделі встановлювали сталеві електроди для вимірювання їх електричного опору. Разом з моделями формували контрольні зразки-куби з розміром ребра 100 мм в кількості 4 шт. для визначення міцності бетону.

Із одного замісу бетонної суміші виготовляли 2 форми з моделями (6 зразків балок): 1 форма (3 балки) – з пучками сталевого дроту (рис. 2.20, а), 1 форма (3 балки) – з композитною арматурою (рис. 2.20, б), а також 4 зразки-куби (рис. 2.20, в). Визначення витрати бетонної суміші на заміс представлено у табл. 2.8.

Таблиця 2.7 – Склад бетону

Матеріали		Склад бетону, кг/м ³		Витрата на заміс, кг
		номінальний ³	виробничий ⁴	
Гранітний заповнювач фракції 2–5 мм (рис. 2.19)	Щ	1220	1232	28,3
Дрібний заповнювач ¹	П	451	465	10,7
Портландцемент ²	Ц	403	403	9,3
Вода водопровідна	В	232	206	4,7
Водоцементне відношення	В/Ц	0,58		

¹пісок кварцовий з розмірами зерен 0,2–0,3 мм, середньозважений розмір 0,2375 мм (рис. 2.21)

²портландцемент ПЦ П/А-Ш-500 ДСТУ Б В.2.7-46 (СЕМ П/А-S 42,5)

³із розрахунку сухих заповнювачів

⁴із розрахунку заповнювачів природної вологості

Таблиця 2.8 – Розрахунок об'єму бетонної суміші на заміс

Форма	Внутрішній розмір гнізда форми						Об'єм 1 гнізда, л	К-ть гнізд	Об'єм бетону, л	К-т втрат	Об'єм замісу, л
	мм			дм							
Моделей шпал	560	100	50	5,6	1,0	0,5	2,8	6	16,8	0,1	23
Контрольних зразків-кубів	100	100	100	1,0	1,0	1,0	1	4	4		



Рис. 2.21 – Гранітний заповнювач фракції 2–5 мм

Бетонну суміш ущільнювали на стандартній лабораторній віброплощадці. Амплітуда коливань – 0,2–0,3 мм, частота – 50 Гц.

Умови твердіння моделей – природні, $20 \pm 2^\circ\text{C}$, відносна вологість 100 %, тривалість твердіння – понад 28 діб (рис. 2.22, з). Моделі, готові для подальших досліджень, представлені на рис. 2.23.

а)



б)



в)



г)



Рис. 2.22 – Відформовані із одного замісу: *а* – моделі з дротяною сталевую арматурою; *б* – моделі з композитною арматурою; *в* – моделі та зразки-куби; *г* – укріті поліетиленовою плівкою моделі та зразки-куби

а)



б)



Рис. 2.23 – Готові для подальших досліджень моделі

Після 28 діб твердіння зразки-куби випробували з визначенням середньої густини та міцності на стиск. Властивості бетону після понад 28 діб природного твердіння наведені у табл. 2.9. Середня густина бетону ρ склала 2365 кг/м^3 , міцність на стиск f – $33,4 \text{ МПа}$.

Таблиця 2.9 – Фізико-механічні властивості бетону

№ зразка а	Маса зразка m , кг	Розмір ребра a		Середня густина ρ , кг/м^3		Руйнівна сила P , кгс	Масштабний коефіцієнт α	Міцність на стиск f		
		см	м					кгс/см ³	МПа	
1		10	0,1		2355,5	37150	0,95	371,5	340,6	33,4
2	2,3725			2372,5		34550		345,5		
3	2,3384			2338,4		28500		285		

2.1.5 Дослідження електричного опору моделей

Для визначення електричного опору моделей в них закладено електроди із сталевих стержнів (рис. 2.23, 2.24). Електричний опір вимірювали на перемінному струмі та постійному струмі за допомогою приладів, наведених на рис. 2.25. Кожне вимірювання на постійному струмі здійснювали до стабілізації вимірюваної величини, яка спостерігалась впродовж 10–15 с.

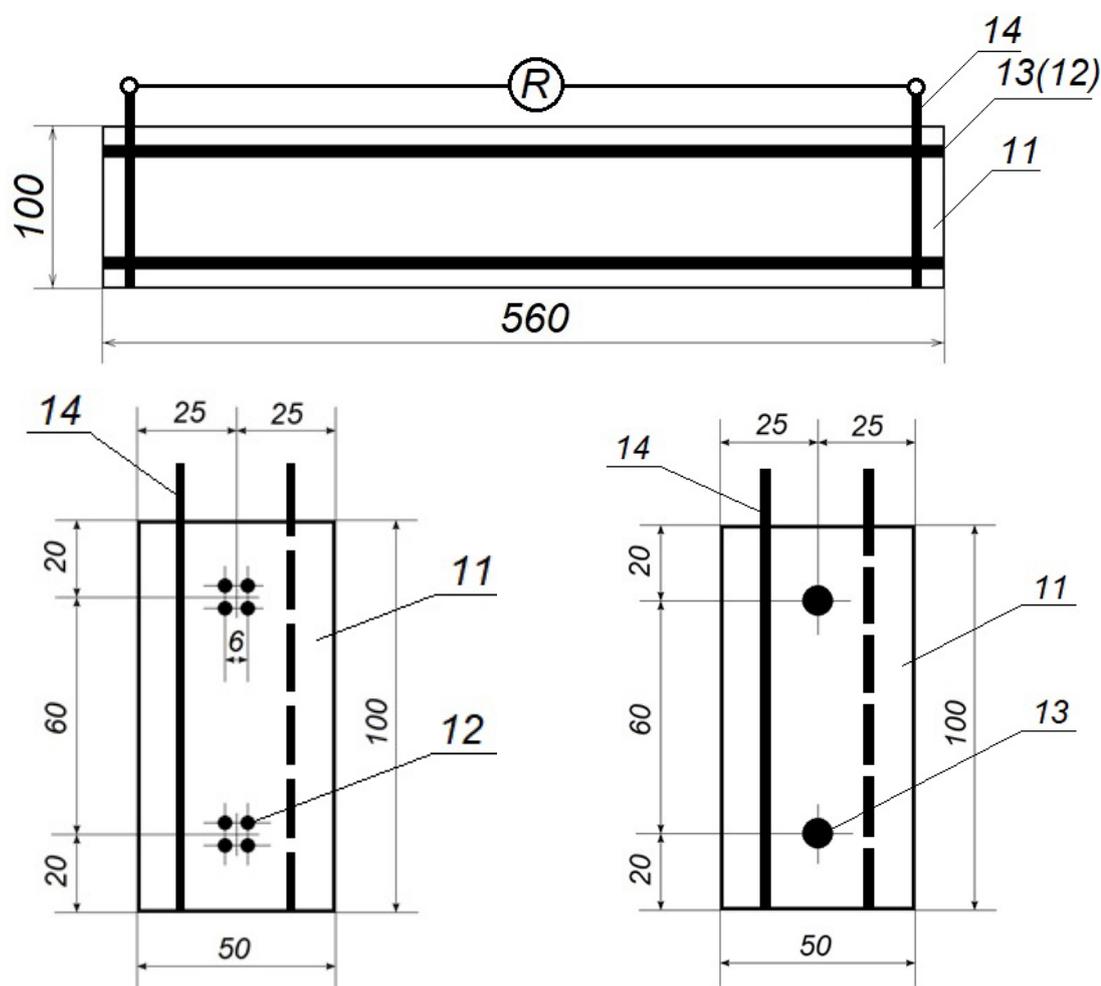
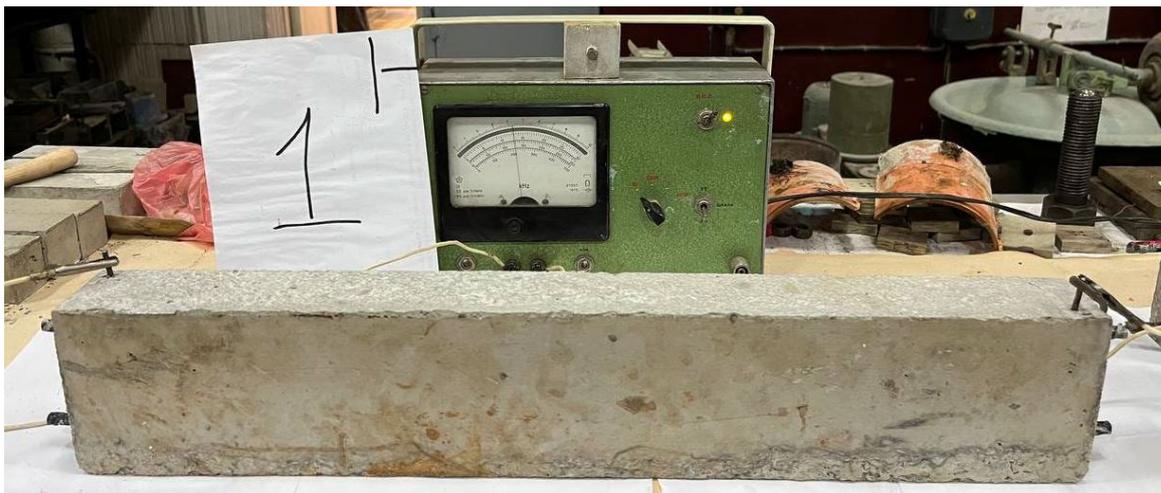


Рис. 2.24 – Схема вимірювання електричного опору моделей: 11 – модель-балка; 12 – сталевая дротьяна арматура; 13 – композитна арматура; 14 – електроди із сталевих стержнів

а)



б)



Рис. 2.25 – Вимірювання електричного опору моделей: *а* – на перемінному струмі омметром виробництва ГНДЛ підрейкових основ і спецзалізобетону УкрДУЗТ; *б* – на постійному струмі цифровим мультиметром Sanwa PC510

Вплив заміни сталевий дотяної арматури композитною на електричний опір шпал на моделях оцінювали коефіцієнтом збільшення електричного опору від такої заміни:

$$K_e = R_c/R_s, \quad (2.1)$$

де R_C і R_S – електричний опір моделі з композитною та сталеву дрютяною арматурою.

2.1.6 Розрахунковий експеримент з навантаження моделей

Для моделей та схеми їх навантаження (рис. 2.3) було проведено розрахунковий експеримент із застосуванням методу скінчених елементів і програмного комплексу LIRA-SAPR з покроковим навантаженням до руйнування, аналізом напружено-деформованого стану на кожній стадії навантаження та побудовою діаграм «стріла прогину Δ » – «навантаження P ». Розрахунок виконували в нелінійній постановці. Для побудови моделі за аналогією з [95, 96] прийнято такі гіпотези:

- бетон змодельовано фізично-нелінійними тривимірними скінченими елементами, арматуру – фізично-нелінійними стержневими скінченими елементами;

- міцність та деформативність бетону характеризували параболічно-лінійними діаграмами деформування σ_c – ε_c , арматури – діаграмою σ_s – ε_s без площадки плинності;

- силу попереднього натягу арматури прикладали впливом від'ємних температур;

- розрахунок проводили кроково-ітераційним методом із двома стадіями навантаження – попередній натяг арматури та передача навантаження, кількість кроків навантаження кожної стадії – 50, прирощення навантажень на кожному кроці – нерівномірне.

2.1.7 Натурний експеримент з навантаження моделей

Моделі шпал зі сталеву дрютяною та композитною арматурою випробували навантаженням у віці не менше 28 діб на випробувальній машині МУП-50 (рис. 2.3, з) з доведенням до руйнування. По мірі

навантаження вимірювали стрілу прогину Δ індикатором годинникового типу ІЧ-1, фіксували утворення тріщин, а також вимірювали на перемінному струмі електричний опір моделі R (за методикою п. 2.1.3). За результатами випробувань будували діаграми деформування «стріла прогину» – «навантаження».

2.2 Методи досліджень агресивних, у т.ч. електричних впливів на корозійні процеси в шпалах зі сталевую та композитною арматурою

2.2.1 Моделювання агресивних, у т.ч. електричних впливів на шпали із бетону

Гіпотеза дослідження: заміна сталеві арматури в бетонних шпалах на композитною забезпечить:

- підвищення їх електричного опору;
- зменшення струмів витoku (зокрема, втрат тягового струму);
- усунення корозійних процесів, пов'язаних з протіканням електричного струму і впливом агресивних середовищ;
- можливість пом'якшити вимоги до тріщиностійкості шпал і зменшити зусилля попереднього напруження арматури.

Метою дослідження було встановлення:

- корозійних процесів в бетоні та цементному камені у шпалах з композиційною арматурою порівняно із залізобетонними шпалами під дією електричного струму, агресивних середовищ;
- корозії композитної арматури в порівнянні зі сталеві арматурою в бетонних шпалах під впливом електричного струму, агресивних середовищ, продуктів гідратації цементу.

Експериментальні дослідження виконувались на масштабних моделях зі сталевим дротяним (для порівняння) і композитним армуванням.

Порівняльні дослідження електричних впливів від електричних потенціалів (струмів витоку) та інших агресивних впливів на бетонні шпали зі сталеву дрютяною та композитною арматурою виконували комплексним дослідженням наслідків цих впливів на зразки, що моделювали такі шпали в умовах експлуатації (табл. 2.8). Електричні та інші агресивні впливи створювали за допомогою експериментальних установок, наведених у табл. 2.8.

Таблиця 2.10 – Агресивні впливи на шпали із бетону в електрифікований колії, позначення та схеми експериментальних установок і зразків, що їх моделюють

№ впливу	Опис агресивного впливу	Позначення установки та зразка з арматурою	
		сталеву дрютяною S	композитною С
1	2	3	4
1	Капілярне підняття води із обводненого баласту від підшви до верху шпали		
2	Дифузія хлорид-іонів (розчину солі, добрив, що просипаються на колію) у вологу погоду від підшви до верху шпали		
3d	Струм витоку від постійного електричного потенціалу на рейці +40 В у вологу погоду (рис. 1, а) протягом 8,4 діб		

Продовження таблиці 2.10

1	2	3	4
4d	Електроміграційне перенесення хлорид-іонів під постійним електричним потенціалом на рейці +40 В (рис. 1, а) протягом 94 год		
3р	Струм витоку від ПОЕП +40 В у вологу погоду (рис. 1, а) протягом 14 діб		
4р	Електроміграційне перенесення хлорид-іонів під ПОЕП +40 В (рис. 1, а) протягом 160 год		

Примітки: ПОЕП – постійний однонаправлений електричний потенціал (15 хв. увімкнено, 10 хв. вимкнено), що відповідає проходженню електрорухомого складу секцією електрифікованої колії; 160 годин впливу ПОЕП за кількістю електрики відповідає 96 годинам безпосереднього електричного впливу; 1 – цементний камінь або розчин зразку; 2 – сталеві дротяна арматура; 3 – композитна арматура; 4 – полівінілхлоридна труба; 5 – силіконовий герметик; 6 – поліетиленовий контейнер; 7 – сталевий накладний електрод.

Моделі виготовляли із цементного тіста без піску (S1, C1, S3, C3) та цементно-піщаного розчину з піском (S2, C2, S4, C4) у вигляді циліндрів діаметром 100 мм висотою 40 мм, поміщених у полівінілхлоридні труби внутрішнім діаметром і висотою 100 мм. Схеми моделей зі сталеві дротяною та композитною арматурою наведені у табл. 2.8.

Вплив №1 (табл. 2.8) моделював капілярне підняття води із обводненого баласту від подошви до верху шпали. Цей вплив без електричного потенціалу створювали на моделі (зразки) S1, C1 із цементного каменю без піску протягом 14 діб за схемою, наведеною у відповідному рядку табл. 2.8.

Вплив №2 моделював дифузію хлорид-іонів (розчину солі, добрив, що просипаються на колію) у вологу погоду від підшви до верху шпали. Цей вплив також без електричного потенціалу створювали на моделі (зразки) S2, C2 із цементно-піщаного розчину у 10 % розчині хлориду натрію $NaCl$ протягом 160 год за схемою, наведеною у відповідному рядку табл. 2.8. Зверху моделі для виключення дифузії катіону натрію наливали 0,3-молярний розчин $NaOH$.

Вплив №3d моделював протікання струму витoku від постійного електричного потенціалу на рейці +40 В у вологу погоду (рис. 1.1, а). Цей вплив створювали на моделі (зразки) S3d, C3d із цементного каменю без піску у воді накладанням постійного потенціалу +40 В протягом 8,4 діб за схемою, наведеною у відповідному рядку табл. 2.8.

Вплив №4d моделював електроміграційне перенесення хлорид-іонів під постійним електричним потенціалом на рейці +40 В (рис. 1.1, а). Цей вплив створювали на моделі (зразки) S4d, C4d із цементно-піщаного розчину у воді накладанням постійного потенціалу +40 В протягом 94 год за схемою, наведеною у відповідному рядку табл. 2.8.

Вплив №3р моделював протікання струму витoku від постійного однонаправленого пульсуючого потенціалу ПООП у вологу погоду (рис. 1.1, а). Цей вплив створювали на моделі (зразки) S3р, C3р із цементного каменю без піску у воді накладанням ПООП +40 В з режимом пульсації: увімкнено – 15 хв., вимкнено – 10 хв. протягом 14 діб за схемою, наведеною у відповідному рядку табл. 2.8.

Вплив №4р моделював електроміграційне перенесення хлорид-іонів під ПООП на рейці +40 В (рис. 1.1, а). Цей вплив створювали на моделі (зразки) S4р, C4р із цементно-піщаного розчину у воді накладанням ПООП +40 В з режимом пульсації: увімкнено – 15 хв., вимкнено – 10 хв. протягом 160 год за схемою, наведеною у відповідному рядку табл. 2.8.

2.2.2 Прилади та обладнання

Для накладання постійного електричного потенціалу на моделі застосовано джерело постійного струму, що створює напругу до 40 В (рис. 2.26, а), а для створення пульсуючого режиму – програмований вмикач-вимикач (рис. 2.26, б).

Накладання електричного потенціалу на моделі створювали через сталеві перфоровані електроди (рис. 2.27).

Експозицію моделей здійснювали в діелектричних поліетиленових контейнерах (рис. 2.28).

Для ущільнення бетону під час виготовлення моделей застосували стандартну лабораторну віброплощадку з частотою колвань 50 Гц та амплітудою 0,2–0,3 мм (рис. 2.29).

Для прискорення твердіння бетону застосовували лабораторну пропарювальну камеру з автоматикою твердіння ПРТ (рис. 2.30).

Для електричних вимірювань використовували цифровий мультиметр Sanwa PC510 (рис. 2.31) з високим входним опором 1000 МОм, оснащений інфрачервоним інтерфейсом з ПК для можливості запису електричних сигналів в режимі реального часу.

Для розрізання моделей навпіл та на окремі зразки застосовували різальний станок з алмазним відрізним кругом (рис. 2.32).

а)



б)



Рис. 2.26 – Прилади для створення постійного та однонаправленого пульсуючого електричного потенціалу: а – джерело постійного струму напругою до 40 В; б – програмований вмикач-вимикач

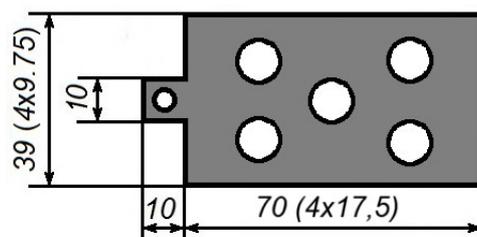


Рис. 2.27 – Накладні сталеві перфоровані електроди для накладання потенціалу на моделі



Рис. 2.28 – Поліетиленові контейнери для експозиції моделей



Рис. 2.29 – Стандартна лабораторна віброплощадка



Рис. 2.30 – Лабораторна пропарювальна камера
з автоматикою твердіння ПРТ



Рис. 2.31 – Цифровий мультиметр Sanwa PC510



Рис. 2.32 – Відрізний станок з алмазним відрізним кругом

2.2.3 Виготовлення зразків-моделей

Зразки виготовляли із цементного каменю з В/Ц = 0,35 (зразки S1, C1, S3, C3) та цементно-піщаного розчину 1:1, В/Ц = 0,35 (S2, C2, S4, C4) у вигляді циліндрів діаметром 100 мм висотою 40 мм, поміщених у полівінілхлоридні труби внутрішнім діаметром і висотою 100 мм.

Заготовлені для виготовлення зразків полівінілхлоридні труби зі вставленою в них сталевую дротяною та композитною арматурою наведені на рис. 2.33, *а*. У труби через просвердлені у стінках на висоті 20 мм отвори встановлювали сталеву дротяну арматуру 4Ø3 мм (S1, S2, S3) та композитну базальтово-епоксидну арматуру Ø8 мм (C1, C2, C3) довжиною 130 мм (рис. 2.33, *а*).

Труби з арматурою встановлювали на піддони (рис. 2.33, *б*), заповнювали на висоту 40 мм цементним тістом або цементно-піщаною сумішшю з ущільненням на лабораторній віброплощині (рис. 2.29, 2.33, *в*). Зразки піддавали тепловологісній обробці в лабораторній пропарювальній камері (рис. 2.33, *г*) за температури 80°C за режимом: попереднє витримування – 1 год + підняття температури – 3 год + ізотермічне витримування – 6 год + остигання – 3 год. Після твердіння контакти розчину і арматури з трубою герметизували силіконовим герметиком.

а)



б)



в)



г)



Рис. 2.33 – Виготовлення моделей: *а* – поліпропіленові труби зі встановленою сталевною дротяною та композитною арматурою; *б* – полівінілхлоридні труби з арматурою, встановлені на піддони; *в* – заповнені сумішшю труби на лабораторній віброплощині; *г* – моделі в пропарювальній камері

2.2.4 Створення агресивних, у т.ч. електричних впливів на моделі

Моделі поміщували у поліетиленові контейнери згідно зі схемами та впливами, наведеними у табл. 2.8 (рис. 2.34). Вплив електричних потенціалів створювали за допомогою сталевих накладних електродів (рис 2.27) та блоку живлення постійного струму з програмованим вимикачем (рис. 2.26, 2.34). Протягом електричного впливу здійснювали вимірювання сили струму крізь зразки та електричного опору зразків за схемами, наведеними у табл. 1, за допомогою цифрового мультиметра Sanwa PC510 (рис. 2.31, 2.34).

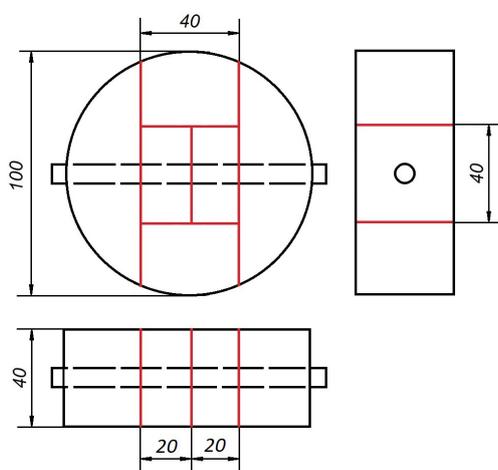


Рис. 2.34 – Підготовка зразків і експериментальних установок зі створення електричних та корозійних впливів на моделі: *a* – установа арматури у форми; *б* – заповнення форм цементним тістом/розчином; *в* – сталеві накладні електроди; *г* – загальний вигляд установок

2.2.5 Дослідження наслідків агресивних, у т.ч. електричних впливів

Для досліджень моделей після агресивних впливів їх розрізали на зразки-призми розміром $40 \times 40 \times 20$ мм та інші за схемою, наведеною на рис. 2.35, а. Зразки, експозиція яких відбувалася у воді – C1, S1, C3d, S3d, C3р, S3р, розрізали з водяним охолодженням. Зразки, експозиція яких відбувалася у розчинах $NaCl$ і $NaOH$ – C2, S2, C4d, S4d, C4р, S4р, для запобігання вимивання хлоридів, розрізали насухо.

а)



б)

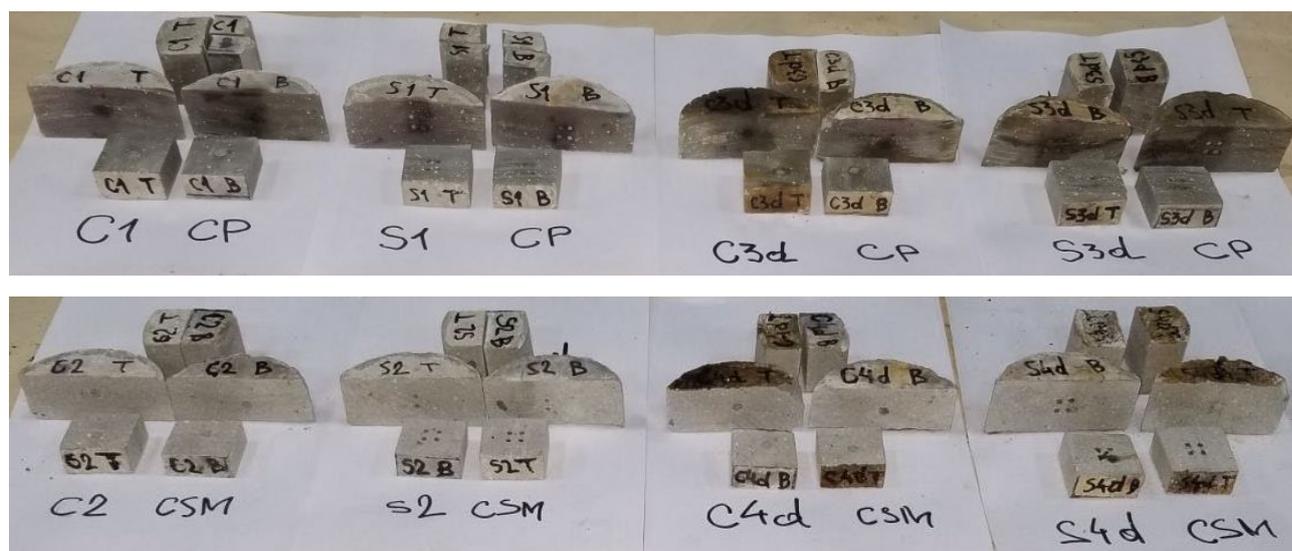


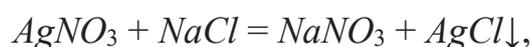
Рис. 2.35 – Зразки для дослідження наслідків агресивних впливів:

а – схема розрізання моделі на зразки; б – зовнішній вигляд зразків

Як передбачувані наслідки цих впливів визначали нейтралізацію цементного каменю та цементно-піщаного розчину, проникнення хлоридів, корозію арматури, зміну мікромеханічних властивостей і структури цементного каменю.

Нейтралізацію цементного каменю та цементно-піщаного розчину визначали нанесенням на зрізи всіх моделей 1 % розчину фенолфталеїну в етанолі. Забарвлення поверхні зрізу в малиновий колір характеризувало збереження лужного середовища, не забарвлення – нейтралізацію цементного каменю внаслідок вилуговування $CaOH_2$.

Глибину проникнення хлоридів визначали за допомогою розчину нітрату срібла. Хлориди, зокрема хлор-іони Cl^- проникають у бетон (розчин) шляхом дифузії, а у разі наявності електричного потенціалу – електроміграційним шляхом. Для якісного визначення хлор-іонів застосовували нітрат срібла (азотнокисле срібло) $AgNO_3$, зокрема, реакцію його взаємодії з хлоридами:



де $AgCl$ – білий сироподібний осад.

Для визначення глибини проникнення хлоридів у цементний камінь або цементно-піщаний розчин на їх зріз наносили 1 % водний розчин нітрату срібла, вимірювали глибину проникнення хлоридів як товщину шару, на якому утворився світлий наліт, за результатами декількох вимірювань розраховували середнє значення x_x . 1 % водний розчин $AgNO_3$: вода дистильована – 100 г (мл); нітрат срібла – 1 г.

Корозію арматури оцінювали оглядом випусків арматури та оптичною мікроскопією на відбиття контакту арматури з цементним каменем і розчином на зрізах зразків за допомогою світлового мікроскопу МБС-2 (рис. 2.36) зі збільшенням 7,5–82,5.



Рис. 2.36 – Світловий мікроскоп МБС-2

2.2.6 Дослідження наслідків агресивних, у т.ч. електричних впливів методом наноіндентування

Для дослідження наслідків агресивних, у т.ч. електричних впливів запропоновано застосувати метод наноіндентування. Розроблено оригінальну методику дослідження. Результати розробки цієї методики викладено у [64, 97].

Зміну мікромеханічних властивостей цементного каменю по висоті моделей, а також відміни міжфазної перехідної зони МПЗ між цементним каменем і арматурою в різних зразках визначали методом наноіндентування поверхні зрізів.

Методом наноіндентування досліджено впливи, вчинені на моделі S3d, C3d, S3p, C3p за відповідними схемами табл. 2.8. Для цього із моделей алмазним диском вирізали зразки розміром 20×20×(10–20) мм: із МПЗ –

S3dC, C3dC, S3pC, C3pC, із нижньої зони – S3dB, C3dB, S3pB, C3pB (рис. 2.35).

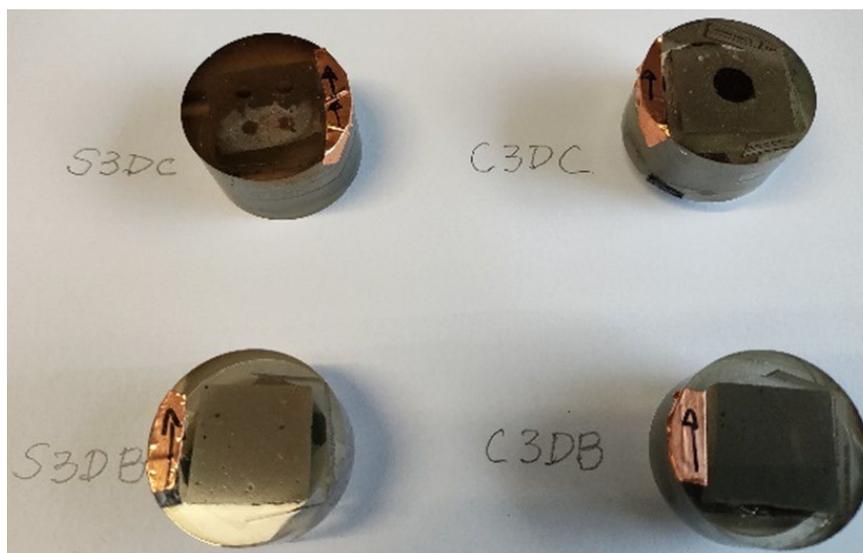
Зазначені зразки вакуумним просочуванням занурювали у циліндр із епоксидної смоли з модулем пружності 3–4 ГПа. Після твердіння епоксидної смоли верхню грань зразків зрівнювали алмазним диском і полірували до розміру нерівностей 0,25 мкм за допомогою алмазних абразивних складів на масляній і спиртовій основі для запобігання подальшої гідратації цементу та вимивання гідратних фаз. Готові зразки наведені на рис. 2.37.

Наноіндентування здійснювали за допомогою приладу Agilent G200 Nano Indenter®, оснащеного алмазним наконечником індентора Berkovich (рис. 2.37, а).

Прототипи методу та пристрою – вимірювання мікротвердості, мікротвердомери. Прилад здійснює вдавлювання індентора в поверхню досліджуваного матеріалу (рис. 2.37, б) з безперервною реєстрацією сили P та глибини проникнення h (рис. 2.37, в). Після контакту індентора з поверхнею до нього прикладається зростаюче навантаження, що спричиняє проникнення його вістря в матеріал. Після досягнення попередньо визначеної величини максимального навантаження та короткого періоду його утримання навантаження знімається, а глибина проникнення зменшується завдяки пружному відновленню деформованого матеріалу. За величинами сили P і глибини проникнення h програмне забезпечення приладу автоматично аналізує цю залежність для кожного відбитка та визначає мікромеханічні властивості – модуль пружності E в ГПа та мікротвердість H в МПа.

Очікувані результати – зміна мікромеханічних властивостей по висоті поперечного перерізу (зменшення зон вилуговування, збільшення зон карбонізації тощо).

а)



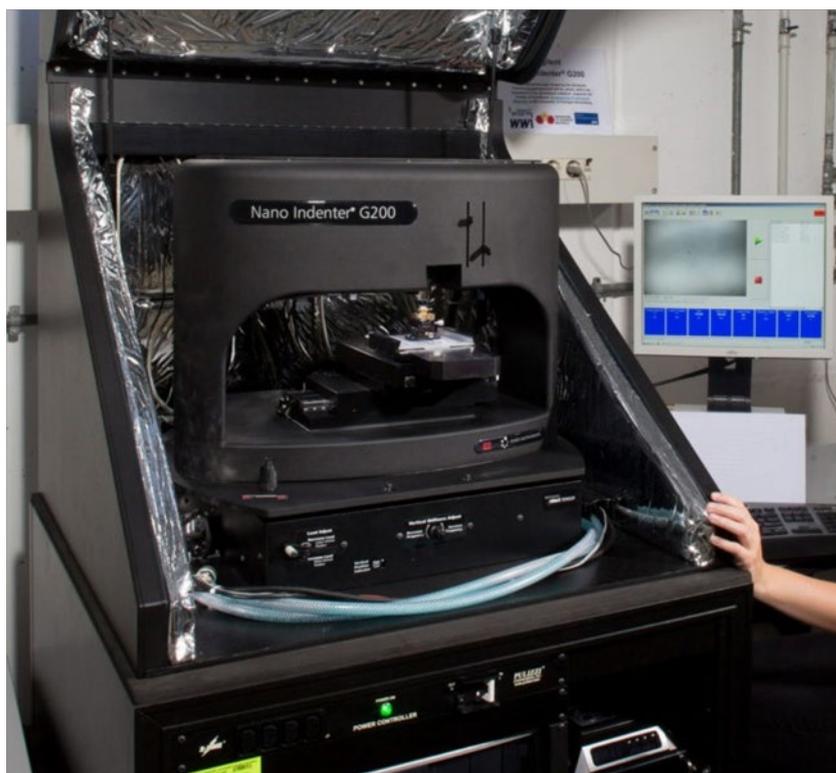
б)



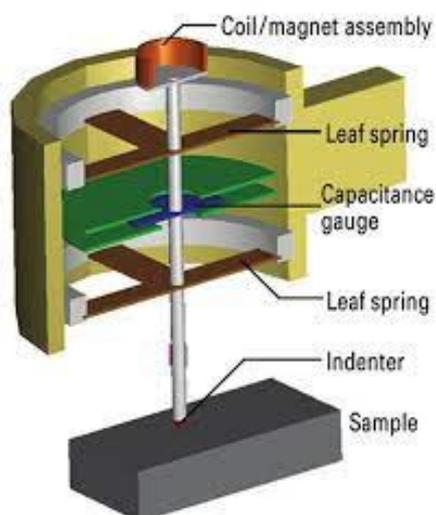
Рис. 2.36 – Підготовлені для наноіндентування зразки зі сталевую та композитною арматурою після впливу у водному середовищі:

a – постійного потенціалу; *б* – ПОЕП

a)



б)



в)

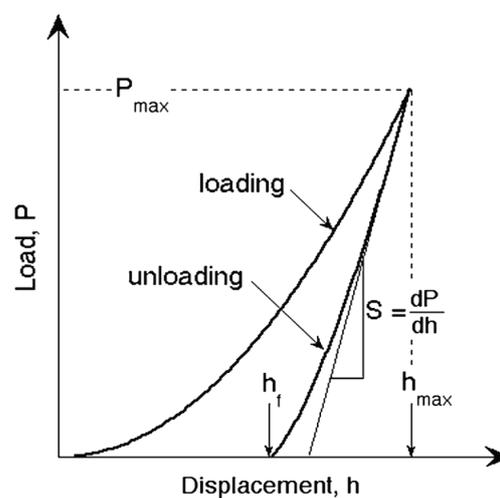


Рис. 2.37 – Прилад Agilent G200 Nano Indenter®, оснащений алмазним наконечником індентора Berkovich: *a* – загальний вигляд; *б* – схема принципу дії; *в* – вигляд діаграми деформування зразка (занурення наконечника)
«глибина занурення h – сила P »

Вимірювання проводили в зонах, розташованих на різних відстанях h від нижньої під час експозиції грані моделі, а також у МПЗ. По висоті зразка досліджували тестові смужки шириною до 1000 мкм, висотою 30 мкм. У МПЗ досліджували області за сіткою з кроком близько 30 мкм з 30–40 вимірюваннями. Індентор занурювали на глибину до 2 мкм. Для кожної точки визначали середнє значення M і H в інтервалі глибини вдавнення 0,3–1 мкм. Для тестових смужок поверхні цементного каменю розраховували середнє значення, середньоквадратичне відхилення, коефіцієнт варіації. За результатами вимірювань будували графіки залежності M і H від відстані h . За характером цих графіків робили висновки про градієнти мікромеханічних властивостей цементного каменю по висоті зразка, а отже, про вплив електричного потенціалу на електрокорозійні процеси.

2.2.7 Електронно-мікроскопічні дослідження наслідків агресивних, у т.ч. електричних впливів

Електронно-мікроскопічні дослідження виконували тих же зразків, які розрізали алмазним диском на менші об'ємом 1–2 см³ так, щоб відкрити поперечні перерізи по вертикалі відносно орієнтації зразків в умовах електричного впливу, полірували алмазною суспензією різного розміру, що зменшувався до розміру 1 мкм і покривали вуглецем. Дослідження проводили за допомогою скануючого електронного мікроскопу Hitachi Regulus 8230 (рис. 2.38) у режимах візуалізації вторинних електронів і зворотного розсіювання електронів (SE і BSE). Елементний мікроаналіз проводили за допомогою системи Oxford Instruments Aztec EDS. Режим зйомки: прискорювальна напруга – 20 кВ, робоча відстань – 15 мм, отримання карти протягом 5–15 повторюваних кадрів і 600 с для лінійного сканування. Дані лінійного сканування були експортовані у формат CSV, що містить відстань і загальну кількість елементів Si та Ca . Відношення Ca/Si було

розраховано як просте арифметичне співвідношення кількості детекторів і нанесено на графік залежності від відстані від низу зразка.



Рис. 2.38 – Скануючий електронний мікроскоп Hitachi Regulus 8230

Висновки за розділом 2

1. Розроблено методику порівняльного дослідження напружено-деформованого стану шпал із бетону з попередньо-напруженою сталеву дрютяною та композитною арматурою на моделях. Методика включає розроблення моделей та розрахунковий і натурний експерименти з їх навантаження, а також порівняння їх результатів для верифікації результатів розрахунків шпал.

2. Розроблено методику зміни електричних властивостей моделей від навантаження.

3. Досліджено фізико-механічні властивості арматури: арматурного дроту періодичного профілю із високовуглецевої сталі Вр1400 діаметром $\varnothing 3$

мм і композитної арматури із базальтового волокна та епоксидного полімеру діаметром $\varnothing 8$ мм. Встановлено, що деформування композитної епоксидно-базальтової арматури, як і сталевго дроту, є пружним, але на відзнаку від нього майже не має площадки текучості, руйнування є крихким. Модуль пружності та границя текучості сталевго дроту складає $E = 14981$ МПа та $f = 540$ МПа, композитної арматури $E = 81301$ МПа та $f = 1400$ МПа. Отже, модуль пружності композитної арматури менше модуля пружності сталевгої арматури у 5,43 рази, границя текучості – у 2,59 раз, що матиме значний вплив на напружено-деформований стан моделей.

4. Досліджено зчеплення бетону з композитною і сталевгою дротяною арматурою. Зчеплення з бетоном складає: сталевгої дротяної арматури – 9,23 МПа, композитної арматури – 6,33 МПа. Зчеплення композитної арматури з бетоном складає 0,69 від зчеплення з бетоном сталевгої дротяної арматури, або менше за нього на 31 %.

5. Розроблено оригінальну методику порівняльного дослідження впливу постійного та пульсуючого однонаправленого електричних потенціалів та агресивних середовищ на шпали із бетону зі сталевгою дротяною та композитною арматурою на моделях. Методика включає розробку моделей, їх експозицію під зазначеними впливами та дослідження наслідків цих впливів, у т.ч. новим методом наноіндентування, який дозволяє визначати мікромеханічні властивості цементного каменю – модуль пружності M та мікротвердість H , які залежать від ступеня її електроміграційного вилуговування.

РОЗДІЛ 3

ТЕОРЕТИЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ШПАЛ ІЗ БЕТОНУ З КОМПОЗИТНОЮ АРМАТУРОЮ

3.1 Дослідження впливу заміни сталеві арматури композитною на напружено-деформований стан шпал

У [84] запропоновано в конструкції шпали для безпідкладкових анкерних пружних рейкових скріплень, наведеній на рис. 1.2 та уточненій на рис. 3.1, *а, б, в* замінити сталеву дротяну арматуру композитною арматурою. Для такої конструкції у [86] в програмному середовищі ЛІРА-САПР створено наведену на рис. 3.2 скінчено-елементну модель, за допомогою якої досліджено напружено-деформований стан шпали з традиційним армуванням високоміцним дротом (рис. 3.3) та проведено пошукові дослідження з аналізу напружено-деформованого стану шпал з композитною арматурою. Зазначену скінчено-елементну модель [86] використано в цьому дослідженні для подальшого аналізу.

У [98] ідеї, висунути у [86], розвинуті та глибше опрацьовані за участю автора. Проаналізовано варіанти композитного армування з 4 та 8 стержнями діаметром 8 мм і 12 мм. На рис. 3.1 наведено розташування традиційної сталеві дротяної арматури (рис. 3.1, *б, в*) і запропонованої композитної арматури (рис. 3.1, *г, д, е, ж*) в підрейковому перерізі (рис. 3.1, *б, г, е*) та середньому перерізі (рис. 3.1, *в, д, ж*).

Оскільки композитна арматура не піддається корозії та електрокорозії, товщину захисного шару з метою збільшення робочої висоти перерізу зменшено до 15 мм. Отже, арматурний пакет із композитних стержнів порівняно з пакетом із сталеві дроту в зазначених перерізах розсунуто для збільшення опору згинальним моментам.

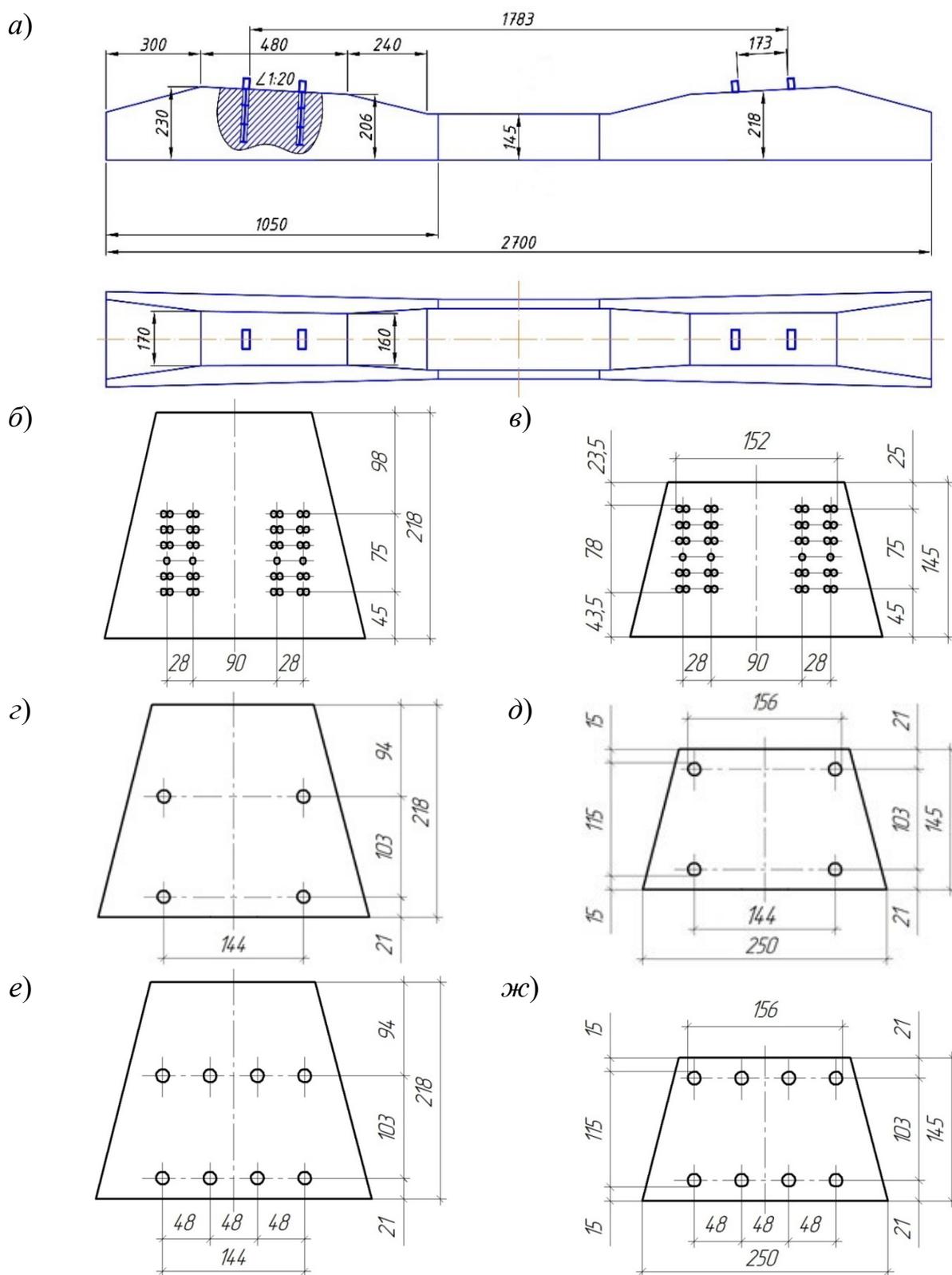
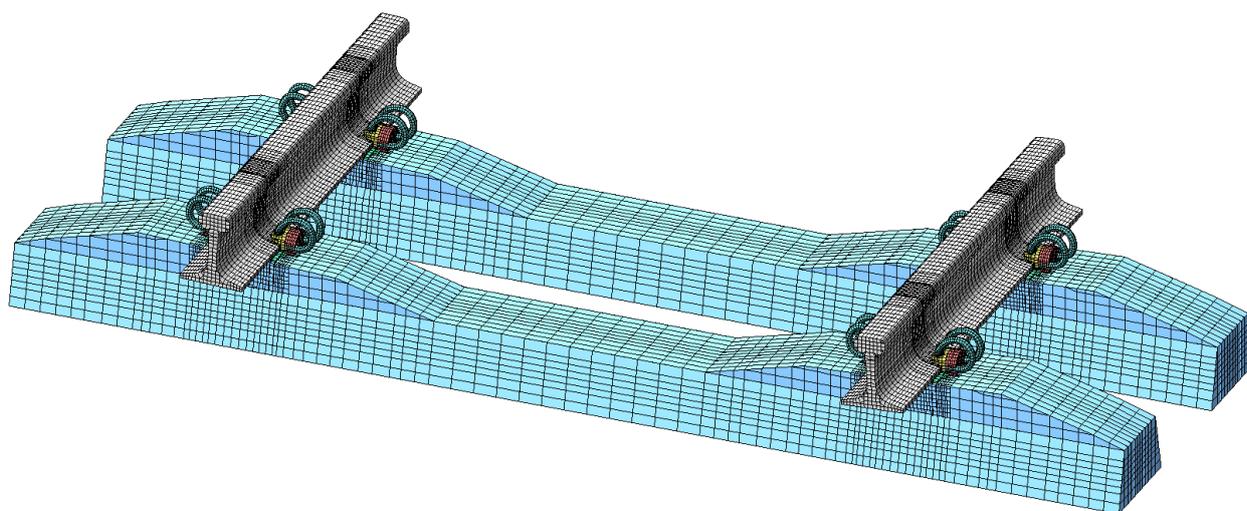
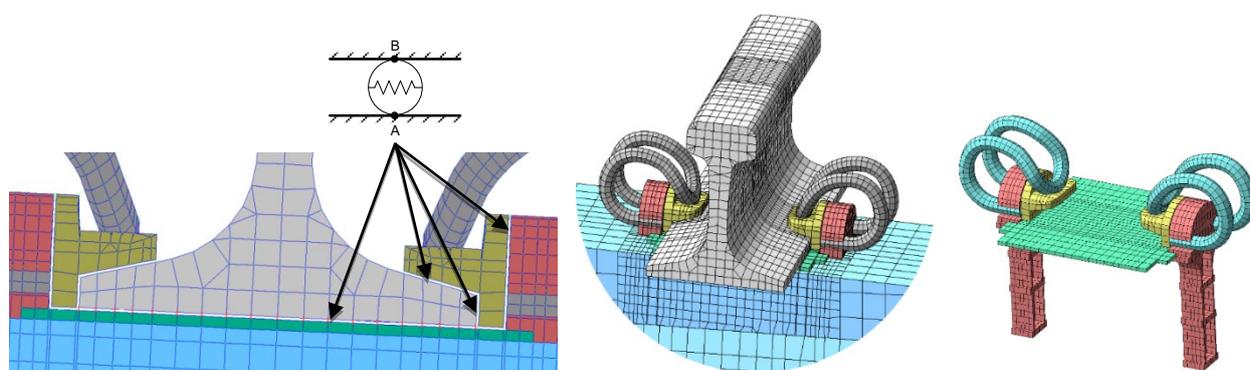


Рис. 3.1 – Шпала із бетону для безпідкладкових анкерних пружних рейкових скріплень: а – конструкція та розміри; б – підрейковий переріз шпали зі сталеву дротяною арматурою; в – середній переріз шпали зі сталеву дротяною арматурою; г – підрейковий переріз шпали з композитною арматурою; д – середній переріз шпали з композитною арматурою

a)



б)



в)

г)

д)

е)

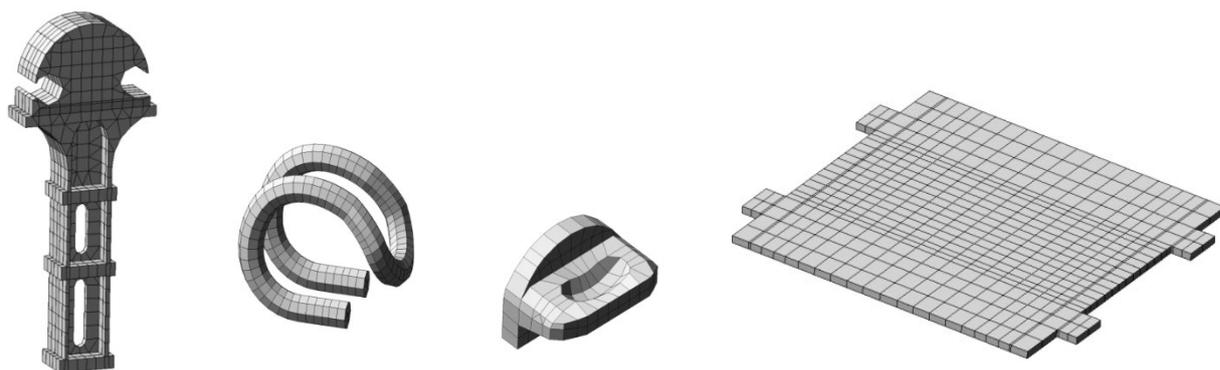


Рис. 3.2 – Скінчено-елементна модель для аналізу напружено-деформованого стану шпал: *а* – загальна модель (дільниці колії на дві шпали); *б* – вузла рейкового скріплення; *в* – закладного анкера; *г* – пружної клеми; *д* – ізолюючого вкладиша; *е* – ізолюючої прокладки

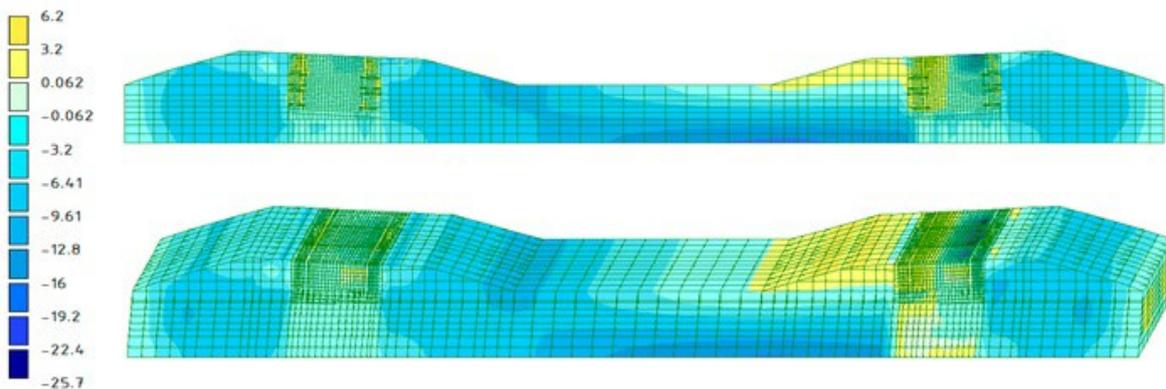


Рис. 3.3 – Поля напружень у шпалі, армованій сталевим дротом 44Ø3Вр1400 з натягом арматурного пакету 353 кН, МПа

Характеристики конструкцій з різними варіантами армування наведено в табл. 3.1, в якій для варіантів армування 44Ø3Вр1400 і композитної епоксидно-базальтової арматури 4Ø8 мм, 8Ø8 мм, 4Ø12 мм та 8Ø12 мм розраховано:

- площу арматури A_s , мм² усієї та крайнього ряду;
- розривне зусилля арматури $f_t A_s$, кН усієї та крайнього ряду;
- умовний граничний момент M з плечем, прийнятим рівним відстані між осями крайніх рядів арматури h , за якого відбудеться розрив крайнього ряду арматури:

$$M \approx 3f_t A_s h / 4, \quad (3.1)$$

де f_t – міцність арматури на розтяг (границя текучост).

Як бачимо із табл. 3.1, розривне зусилля не менше, ніж у залізобетонній шпалі, забезпечує для крайнього ряду арматури – всі варіанти композитного армування діаметром 8 і 12 мм, для всієї арматури в перерізі – всі варіанти крім чотирьох стержнів діаметром 8 мм. Граничний момент у перерізі не менший, ніж у залізобетонній шпалі, забезпечують всі варіанти композитного армування діаметром 8 і 12 мм. Отже, за всіма зазначеними

характеристиками не поступаються 44Ø3Вр1400 варіанти з композитним армуванням 8Ø8 мм, 4Ø12 мм та 8Ø12 мм. З урахуванням необхідності сприймання попереднього напруження усією арматурою перерізу для подальшого аналізу приймемо найбільш економічний з них варіант армування 8Ø8 мм.

Таблиця 3.1 – Характеристики конструкції шпали зі сталевую дротяною та композитною стержневою арматурою

Арматура			Діаметр, мм	Кількість стержнів	Площа перерізу арматури A_s , мм ²	Розривне зусилля арматуро нога пакету $f_t A_s$, кН,	Висота арматурного пакету в осях крайніх рядів h , м	Максимальний руйнівний момент $M \approx 3f_t A_s h/4$, кН·м
Вид	Модуль пружності E_s , МПа	Границя текучості f_t , МПа						
Високоміцний сталевий дріт Вр1400	200000	1400	3	$\frac{44}{8}$	$\frac{311,0}{56,55}$	$\frac{435,4}{79,2}$	0,075	4,453
Композитна епоксидно-базальтова	50000	1100	8	$\frac{4}{2}$	$\frac{201,0}{100,5}$	$\frac{221,2}{110,6}$	0,103	8,543
				$\frac{8}{4}$	$\frac{401,9}{201,1}$	$\frac{442,3}{221,2}$		17,09
			12	$\frac{4}{2}$	$\frac{452,2}{226,2}$	$\frac{497,6}{248,8}$		19,22
				$\frac{8}{4}$	$\frac{904,3}{452,4}$	$\frac{995,3}{497,6}$		38,44

*Модуль пружності та міцність на розтяг композитної епоксидно-базальтової арматури за [92, 93]

Вплив заміни сталеві арматури композитною на напружено-деформований стан шпал досліджено шляхом розрахункових експериментів з

аналізом напружено-деформованого стану шпали із бетону з армуванням композитною епоксидно-базальтовою арматурою $8\text{Ø}8$ мм (рис. 3.1, а, е, ж). Розрахунки виконували методом скінчених елементів із застосуванням програмного комплексу ЛІРА-САПР на скінчено-елементній моделі, наведеній на рис. 3.2. Характеристики моделі наведено у табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Характеристики скінчено-елементної моделі шпал із стержневою композитною арматурою

№	Показник	Од. вим.	Значення
1	Модуль пружності рейкової сталі	МПа	$2,1 \times 10^5$
2	Модуль пружності композитної арматури	МПа	$0,43 \times 10^5$
3	Армування шпали композитною арматурою	шт.	$8\text{Ø}8\text{мм}$
4	Висота арматурного пакету	мм	103
5	Зусилля попереднього натягу арматурного пакету	кН	353, 265, 177, 89, 0
6	Коефіцієнт Пуассона рейкової сталі	–	0,3
7	Модуль пружності бетону класу С35/45	МПа	$3,75 \times 10^4$
8	Коефіцієнт Пуассона бетону класу С35/45	–	0,18
9	Модуль пружності на стиск підрейкової прокладки типу ПРП-3.2 для рейок типу Р65	МПа	33
10	Коефіцієнт Пуассона підрейкової прокладки	–	0,47
11	Модуль пружності вкладиша ВІП на стиск	МПа	10
12	Коефіцієнт Пуассона вкладиша ВІП	–	0,35
13	Статична жорсткість на стиск підрейкової прокладки типу ПРП-3.2 для рейок типу Р65	кН/мм	110–590
14	Мінімальне значення сили притиснення рейки клемою типу КП-5.2	кН	10

Розрахунки виконано для епюри шпал 1840 шт./км, кривої ділянки колії, осьового навантаження на колію 232 кН/вісь, що відповідає впливу на колію пасажирського рухомого складу зі швидкостями руху понад 160 км/год. Клас бетону прийнято С35/45. Варіювали зусилля попереднього натягу арматури 353 кН (100 % проєктного для залізобетонної шпали), а також зниженого на 25, 50, 75, 100 %, отже до 265 кН (75 %), 177 кН (50 %), 89 кН (25 %), 0 кН (без попереднього напруження). Попереднє напруження арматури

змодельовано температурним напруженням за допомогою коефіцієнту температурної деформації.

Достовірність результатів розрахунків забезпечена прийняттям передумов та скінчено-елементної моделі для шпал, армованих сталевим дротом (рис. 3.2), та верифікацією за допомогою лабораторних експериментальних досліджень на моделях.

Результати розрахунків у вигляді полів напружень наведено на рис. 3.4, узагальнені чисельні величини результатів у вигляді максимальних значень розтягувальних і стискаючих напружень для зон підрейкових і середніх перерізів – у табл. 3.3. На рис. 3.5 побудовано графіки залежностей максимальних стискаючих і розтягувальних напружень в зонах підрейкового та середнього перерізу шпал, армованих композитною арматурою, від зусилля попереднього натягу арматурного пакету. Зазначені залежності добре апроксимуються поліномами другого ступеня (квадратними рівняннями) з коефіцієнтами кореляції 0,97–0,99.

Порівняльний аналіз рис. 3.3, 3.4, 3.5 і табл. 3.3 показує, що у шпалах за будь-якого натягу арматури найбільш навантаженими зонами є зони підрейкових перерізів і анкерів. За однакового попереднього натягу арматури 353 кН максимальні стискаючі напруження у бетоні шпал, армованих сталевим дротом (рис. 3.3) і композитною арматурою (рис. 3.4, *a*) майже однакові – близько 26 МПа. Розтягувальні напруження в шпалах з композитною арматурою 4,5 МПа навіть на 27 % менші порівняно зі шпалами зі сталеву дротяною арматурою 6,2 МПа за рахунок розсунутого арматурного пакету. Ці величини перевищують міцність бетону на розтяг, що підтверджує схильність шпал з безпідкладковими анкерними рейковими скріпленнями до утворення тріщин.

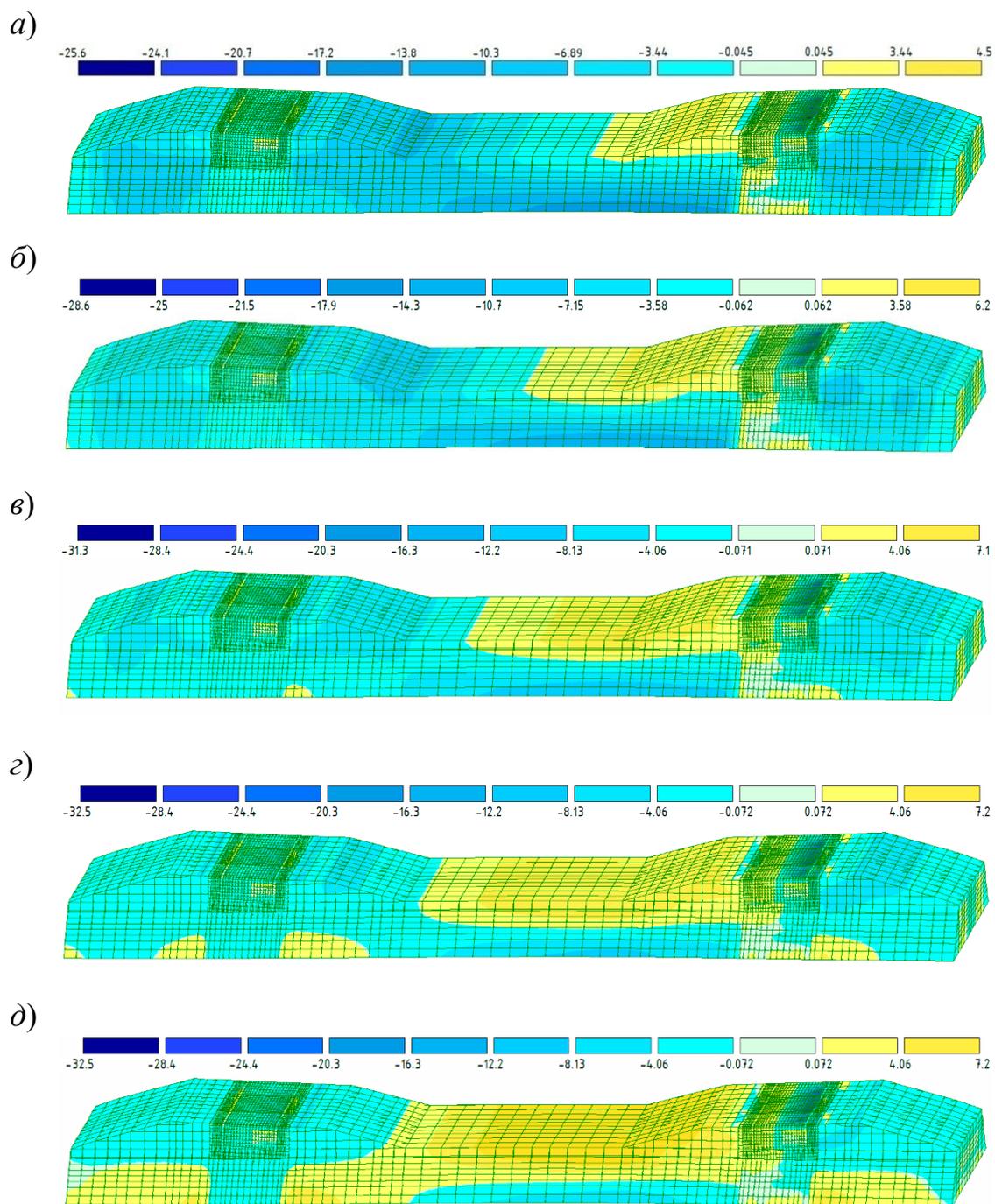


Рис. 3.4 – Поля напружень у шпалі із бетону, армованій композитними стержнями $8\varnothing 8$ з натягом арматурного пакету, МПа: *a* – 353 кН (100 %); *б* – 265 кН (75 %); *в* – 177 кН (50 %); *г* – 89 кН (25 %); *д* – 0 кН (без натягу)

Таблиця 3.3 – Результати розрахункового експерименту з аналізом напружено-деформованого стану попередньо напружених бетонних шпал зі сталевую дрютяною та композитною стержневою арматурою

Армування	Натяг арматурного пакету N_{pk}		Максимальні напруження, МПа				Тріщини в розтягнутій зоні середнього перерізу
			в зоні підрейкового перерізу		в зоні середнього перерізу		
	кН	%	стискаючі	розтягувальні	стискаючі	розтягувальні	
44Ø3Вр1400	353	100	-25,7	+6,2	-16,7	+0,12	ні
8Ø8 мм КОМПОЗИТНЕ	353	100	-25,6	+4,5	-16,1	+1,1	ні
	265	75	-28,6	+6,2	-13,7	+6,2	так
	177	50	-31,3	+7,1	-12,1	+7,1	так
	89	25	-32,5	+7,2	-10,5	+7,2	так
	0	0	-32,5	+7,2	-7,69	+7,2	так

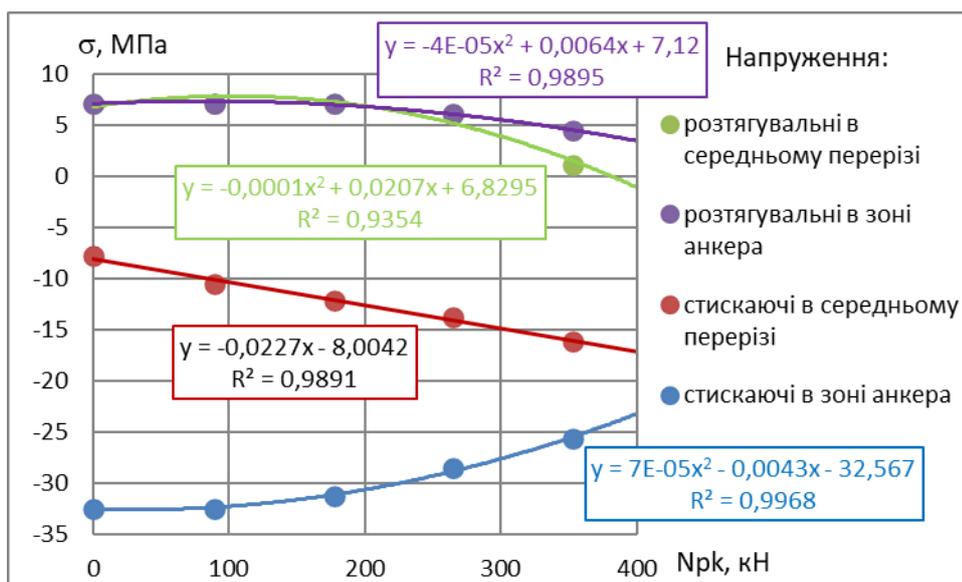


Рис. 3.5 – Залежність максимальних значень напружень у шпалі σ від зусилля натягу арматурного пакету N_{pk}

У середньому перерізі за однакового попереднього натягу арматури 353 кН максимальні напруження складають для шпал з композитною та сталевую дрютяною арматурою: стискаючі – 16,1 і 16,7 МПа; розтягувальні – 1,1 і 0,12 МПа. Максимальні розтягувальні напруження в бетоні шпали з композитною арматурою у середньому перерізі близько 1,1 МПа

перевищують напруження у шпалі зі сталеву арматурою 0,12 МПа на порядок, хоча й не створюють умов для утворення тріщин в бетоні. Як бачимо, всі напруження менші границі міцності бетону на стиск і розтяг, отже умови міцності та тріщиностійкості для середнього перерізу виконуються.

Зниження попереднього натягу композитної арматури на 25 % та більше призводить до незначного збільшення максимальних стискаючих напружень, проте розтягувальні напруження і в підрейковому, і в середньому перерізі збільшуються до 6,2 МПа (за зниження 25 %), що перевищує границю міцності на розтяг та спричиняє утворення тріщин у розтягнутій зоні підрейкових і середнього перерізу. Зниження попереднього натягу вдвічі (на 50 %) обумовлює збільшення максимального розтягувального напруження до 7,1 МПа, що ще більше перевищує границю міцності бетону на розтяг. Подальше зниження попереднього напруження не призводить до суттєвого збільшення розтягувальних напружень.

Отже, на напружено-деформований стан шпали в більшому ступені впливає величина попереднього натягу арматурного пакету, в меншому ступені – вид арматури. Проте з композитною арматурою погіршується тріщиностійкість шпали. Отже, зниження попереднього напруження композитної арматури не призведе до руйнування бетону в стиснутих зонах, проте обумовить роботу шпал із тріщинами у розтягнутій зоні середнього перерізу.

Оскільки тріщини в бетоні на відзнаку від сталеві арматури не спричиняють корозію композитної арматури, була припущена допустимість зниження рівня попереднього напруження композитної арматури для шпал.

Уточнити умови тріщиноутворення у шпалах з композитною арматурою, вплив тріщин на їх електрофізичні властивості, а також припустимість тріщин дозволять експериментальні дослідження на моделях шпал.

3.2 Дослідження впливу заміни сталевій арматури композитною на напружено-деформований стан шпал на моделях

Для верифікації результатів розрахунків міцності, жорсткості та тріщиностійкості шпал з композитною арматурою за методикою п. 3.1 запропоновані експериментальні дослідження у складі розрахункового та натурального експериментів на моделях з отриманням залежностей «навантаження (сила, напруження) – деформація згину», «навантаження – кількісні характеристики тріщиноутворення».

3.2.1 Схема моделей та їх випробування

Як моделі обрано бетонні балки з армуванням двома композитними стержнями або двома пучками сталевий дроту – одного в розтягнутій зоні, одного в стиснутій зоні. Схема моделі та її випробування наведена на рис. 2.3, а.

3.2.2 Вихідні дані для розрахунку моделей

Перед натурним експериментом з випробування навантаженням балок-моделей попередньо напружених бетонних шпал зі сталевий дротяною та композитною арматурою здійснюють розрахунковий експеримент з такого ж навантаження методом скінчених елементів. Вихідними даними для побудови скінчено-елементних моделей є конструкція, характеристики армування та попереднього напруження, схема навантаження балок. Навантаження балок під час натурального і розрахункового експериментів передбачена ступенями з фіксацією прогинів та утворення тріщин до руйнування.

Розрахункова схема складена з урахуванням можливості випробувальної машини (рис. 2.3, з). Конструкція і схема навантаження балок-моделей

попередньо-напружених бетонних шпал зі сталевую дротяною та композитною арматурою наведена на рис. 2.3, а, б. Характеристики їх армування за результатами власного дослідження (п. 2.1.2) та попереднього напруження, досягнутого під час виготовлення моделей (п. 2.1.4), наведені у табл. 3.4. Для навантаження балки розміщували на шарнірних опорах (рис. 2.3, з).

Таблиця 3.4 – Характеристики армування та попереднього напруження балок-моделей шпал

Арматура	Діаметр стержня, мм	Модуль пружності E , МПа	Міцність на розтяг f_t , МПа	К-ть стержнів в поперечному перерізі балки	Зусилля попереднього напруження пакету, кН	Міцність бетону на стиск f_c , МПа
Сталевий дріт	3	81301	1400	8	29,25	33,4
Композитна епоксидно-базальтова	8	14981	540	2	22,64	
					0	

3.2.3 Розрахунки напружено деформованого стану моделей

За вихідними даними, наведеними у п. 3.2.2, виконано розрахунки напружено-деформованого стану моделей із бетону класу С35/45, армованих сталевим дротом 8Ø3Вр1400 і композитною арматурою 2Ø8. Розрахунки виконані методом скінчених елементів. Докладні результати розрахунків наведені у додатку В: на рис. В.1–В.13 – поля напружень моделей зі сталевую дротяною арматурою із зусиллями попереднього натягу 58 кН, 29 кН і 0 кН (без натягу) та композитною арматурою із зусиллям попереднього натягу 46 кН, 23 кН і 0 кН (без натягу) за різних навантажень із доведенням до руйнування, у табл. В.1 – величини напружень і деформацій, отриманих розрахунком для кожного ступеня навантаження зазначених моделей.

Найбільш характерні поля напружень, які відповідають стадіям деформування/руйнування – утворення тріщин в розтягнутій зоні, утворення тріщин в стиснутій зоні, утворення пластичного шарніру, руйнування наведені на рис. 3.6 – 3.11 і узагальнені у табл. 3.5.

Таблиця 3.5 – Центральне навантаження P та прогин Δ моделей зі сталевим дротяним та композитним армуванням, за яких досягається їхня стадія деформування/руйнування

Армування	Натяг арматурного пакету, кН	Етапи деформування/руйнування							
		Тріщини в розтягнутій зоні		Тріщини в стиснутій зоні		Пластичний шарнір		Руйнування	
		M , кН·м	f , мм	M , кН·м	f , мм	M , кН·м	f , мм	M , кН·м	f , мм
8Ø3Ст	58	2,09	0,25	3,43	0,53	4,53	1,56	4,78	3,57
	29	1,35	0,16	3,43	0,71	4,05	1,40	4,30	3,40
	0	0,86	0,10	1,84	1,05	–	–	2,33	3,57
2Ø8Комп	46	2,09	0,23	3,43	0,57	4,05	0,95	4,30	3,77
	23	1,10	0,12	3,08	0,67	3,55	1,50	3,80	3,03
	0	0,86	0,11	1,69	1,30	–	–	1,95	3,20

На підписах під рис. 3.6–3.11 прийнято такі позначення:

N_{pk} – зусилля попереднього натягу арматурного пакету;

P – навантаження, кгс;

M – згинальний момент від навантаження:

$$M = Pl/4, \quad (3.2)$$

де l – відстань між опорами (рис. 2.3, а);

σ^+ – максимальне розтягувальне напруження, МПа;

σ^- – максимальне стискаюче напруження, МПа;

f – стріла прогину, мм;

N_p – подовжня сила у пучку стержнів (рис. 3.7, а) або стержні (рис. 3.7, б) в розтягнутій зоні, кН.

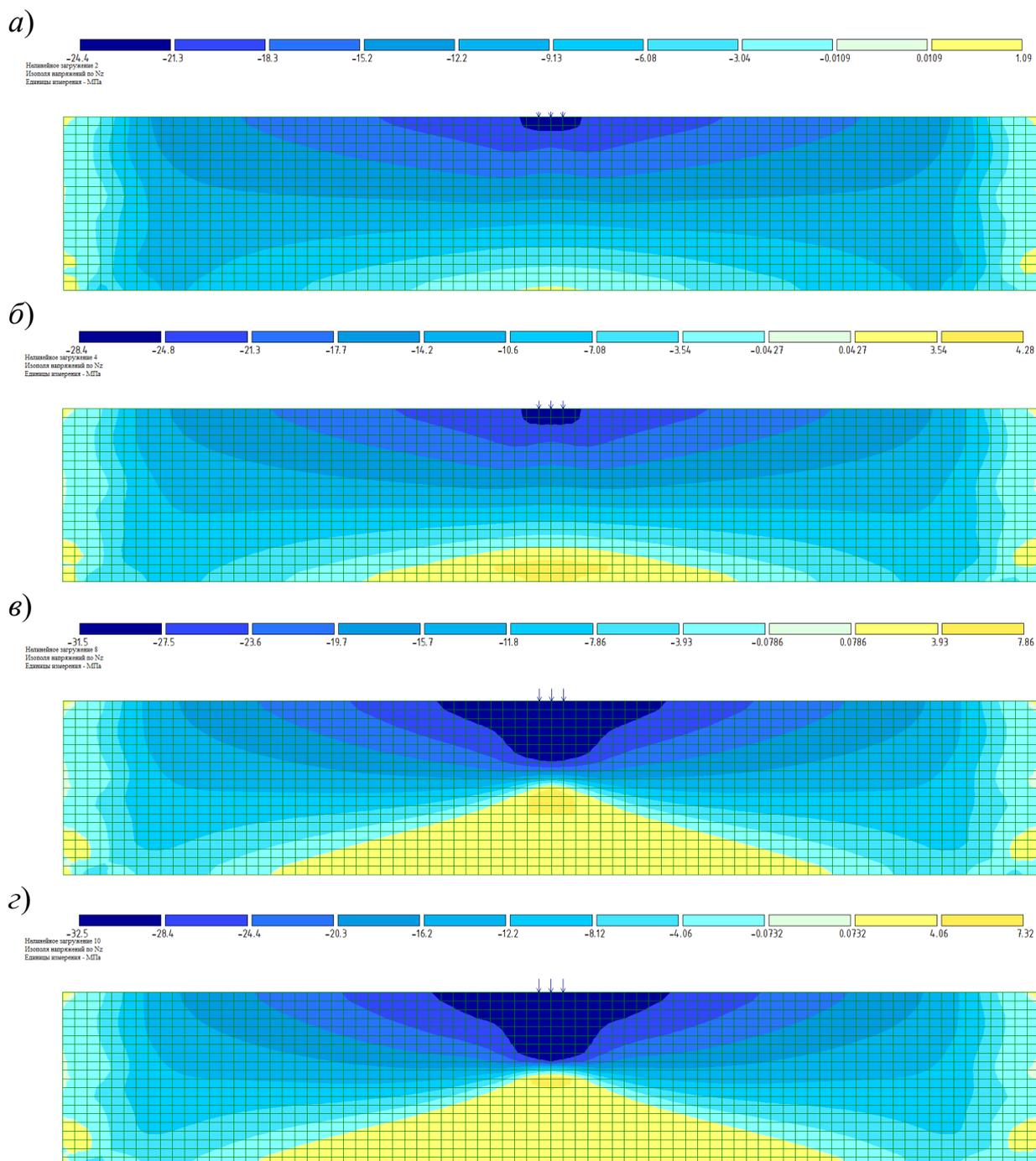


Рис. 3.6 – Поля напряжений в модели зі сталевим дротом, $N_{pk} = 58$ кН:
 а – $P = 7,85$ кН, $M = 1,96$ кН·м, $\sigma^+ = 1,09$ МПа, $\sigma^- = -24,4$ МПа, $f = 0,263$ мм,
 $N_p = 29,5$ кН, утворення тріщин в розтягнутій зоні (за $P = 8,34$ кН);
 б – $P = 11,8$ кН, $M = 2,95$ кН·м, $\sigma^+ = 4,28$ МПа, $\sigma^- = -28,4$ МПа, $f = 0,416$ мм,
 $N_p = 29,9$ кН, утворення тріщин в стисненій зоні (за $P = 13,2$ кН);
 в – $P = 17,7$ кН, $M = 4,43$ кН·м, $\sigma^+ = 7,86$ МПа, $\sigma^- = -31,5$ МПа, $f = 1,33$ мм,
 $N_p = 33,3$ кН, утворення пластичного шарніру (за $P = 18,2$ кН, $M = 4,55$ кН·м);
 г – $P = 19,1$ кН, $M = 4,78$ кН·м, $\sigma^+ = 7,32$ МПа, $\sigma^- = -32,5$ МПа, $f = 3,57$ мм,
 $N_p = 39,1$ кН, руйнування

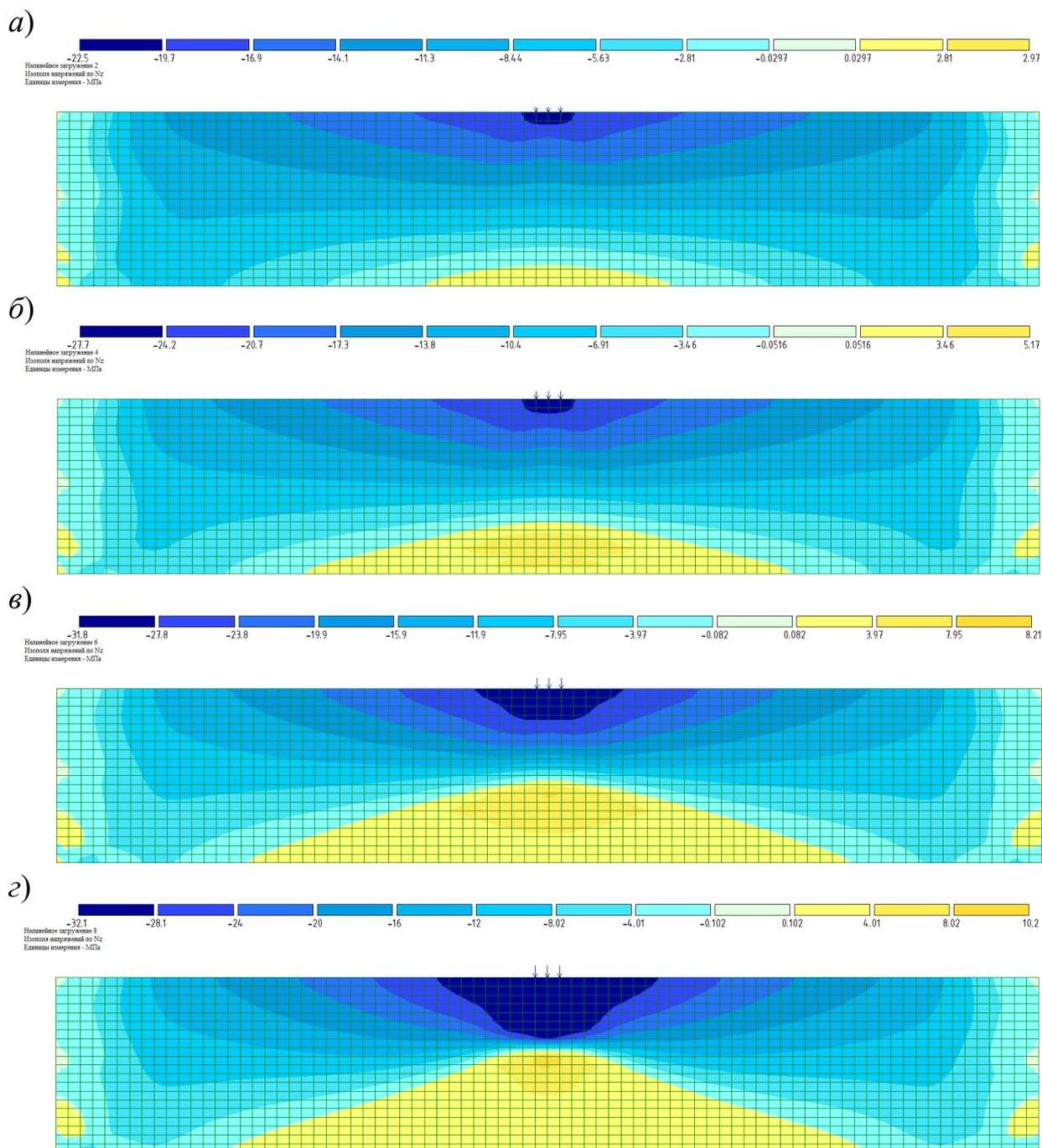


Рис. 3.7 – Поля напружень в моделі з композитною арматурою, $N_{pk} = 46$ кН:
 а – $P = 7,85$ кН, $M = 1,96$ кН·м, $\sigma^+ = 2,97$ МПа, $\sigma^- = -22,5$ МПа, $f = 0,24$ мм,
 $N_p = 23,2$ кН, утворення тріщин в розтягнутій зоні (за $P = 8,34$ кгс);
 б – $P = 11,8$ кН, $M = 2,95$ кН·м, $\sigma^+ = 5,17$ Мпа, $\sigma^- = -27,7$ Мпа, $f = 0,42$ мм,
 $N_p = 23,3$ кН, утворення тріщин в стисненій зоні (за $P = 12,3$ кН);
 в – $P = 15,7$ кН, $M = 3,93$ кН·м, $\sigma^+ = 8,21$ МПа, $\sigma^- = -31,8$ МПа, $f = 0,82$ мм,
 $N_p = 23,9$ кН, утворення пластичного шарніру (за $P = 16,2$ кН, $M = 4,05$ кН·м);
 г – $P = 17,2$ кН, $M = 4,30$ кН·м, $\sigma^+ = 10,2$ МПа, $\sigma^- = -32,1$ МПа, $f = 3,77$ мм,
 $N_p = 29,6$ кН, руйнування

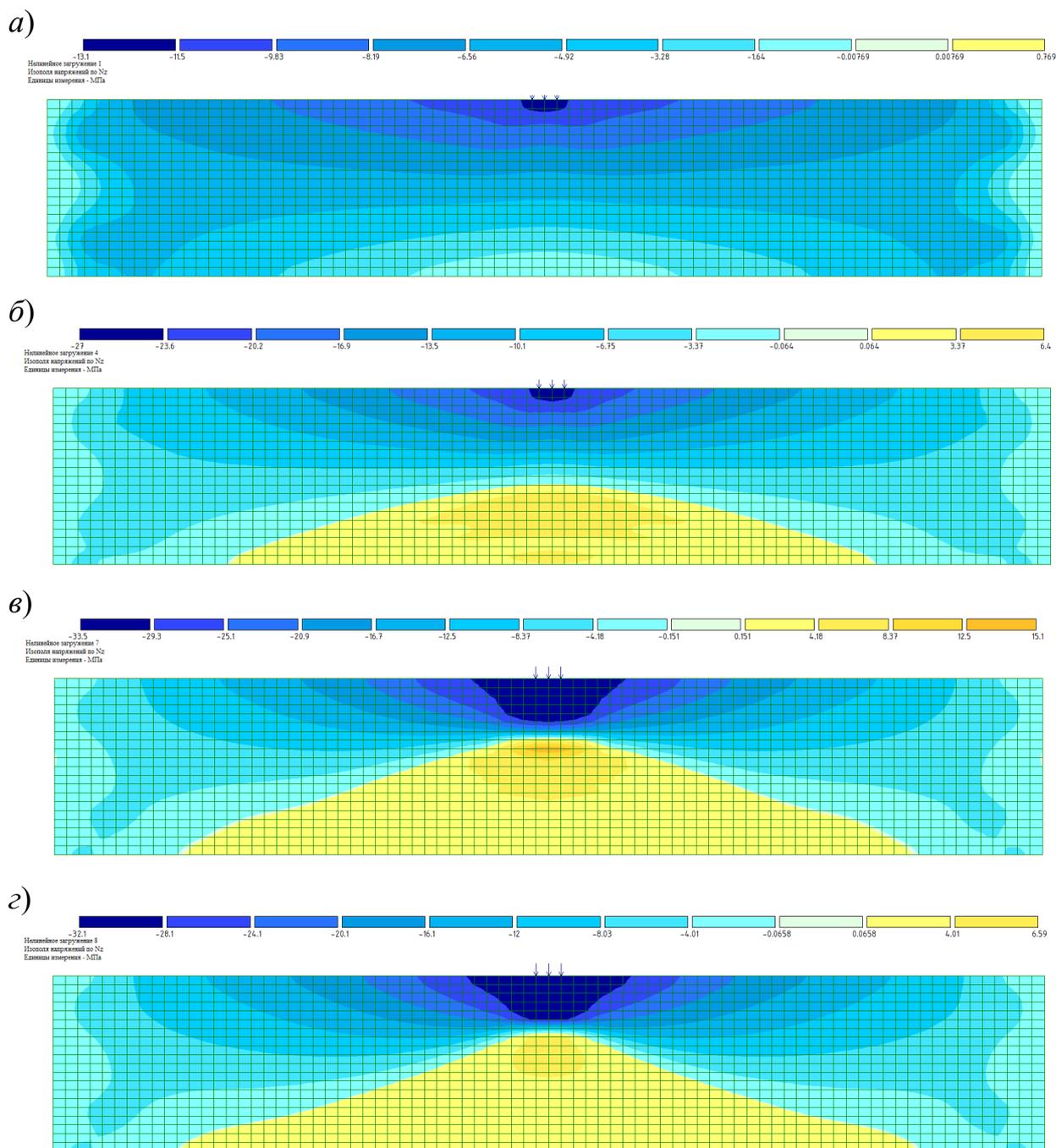


Рис. 3.8 – Поля напружень в моделі зі сталевим дротом, $N_{pk} = 29$ кН:

а – $P = 3,92$ кН, $M = 0,98$ кН·м, $\sigma^+ = 0,77$ МПа, $\sigma^- = -13,1$ МПа, $f = 0,11$ мм,
 $N_p = 14,8$ кН, утворення тріщин в розтягнутій зоні (за $P = 5,40$ кгс);

б – $P = 11,8$ кгс, $M = 2,95$ кН·м, $\sigma^+ = 6,4$ МПа, $\sigma^- = -27$ МПа, $f = 0,44$ мм,
 $N_p = 15,9$ кН, утворення тріщин в стисненій зоні (за $P = 12,8$ кгс);

в – $P = 16,7$ кН, $M = 4,18$ кН·м, $\sigma^+ = 15,1$ МПа, $\sigma^- = -33,5$ МПа, $f = 1,81$ мм,
 $N_p = 20,5$ кН, утворення пластичного шарніру (за $P = 16,2$ кгс, $M = 4,05$ кН·м);

г – $P = 17,2$ кН, $M = 4,30$ кН·м, $\sigma^+ = 6,59$ МПа, $\sigma^- = -32,1$ МПа, $f = 3,4$ мм,
 $N_p = 25,5$ кН, руйнування

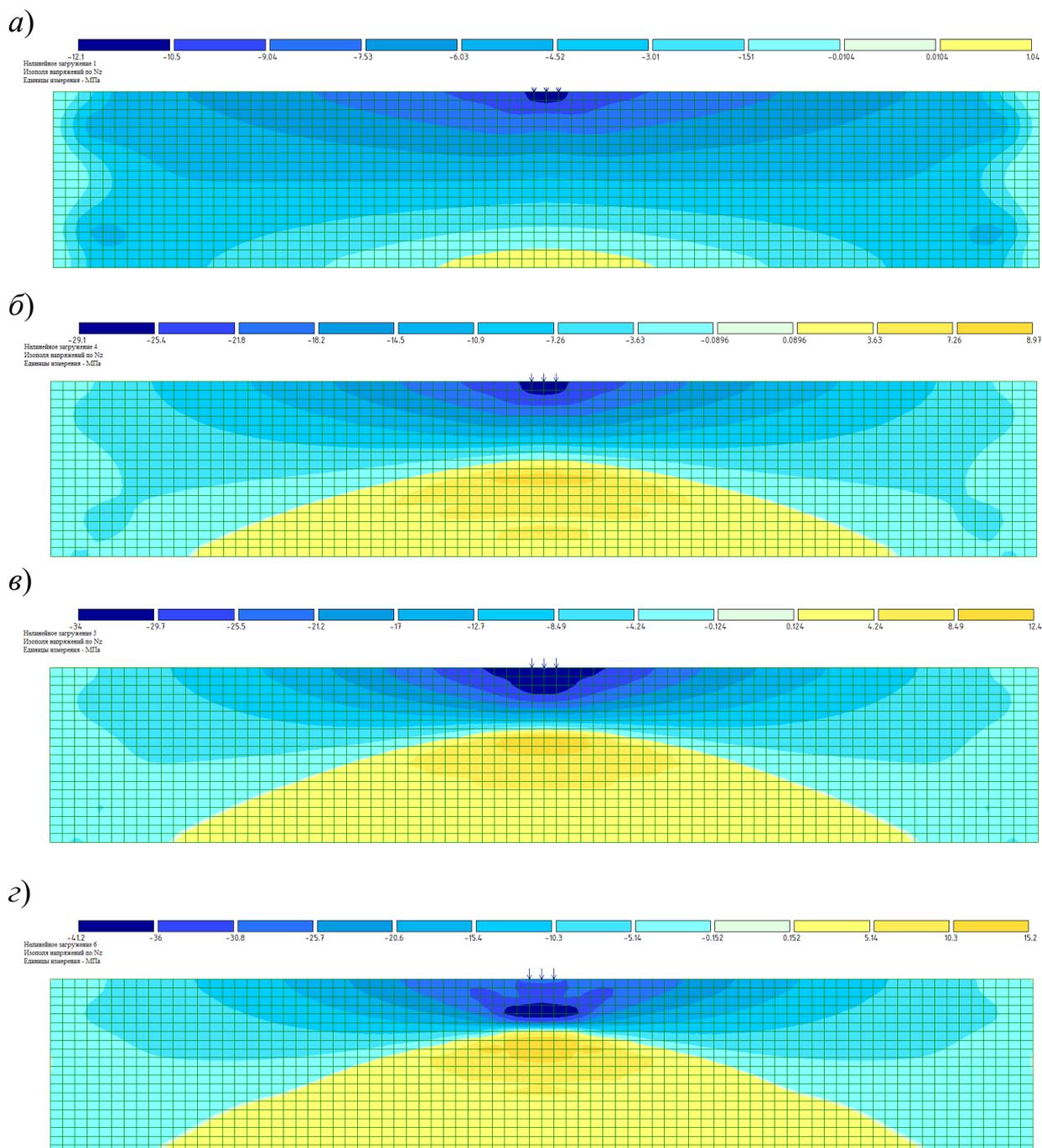


Рис. 3.9 – Поля напряжень в моделі з композитною арматурою, $N_{pk} = 23$ кН:
 а – $P = 3,92$ кН, $M = 0,98$ кН·м, $\sigma^+ = 1,04$ МПа, $\sigma^- = -12,1$ МПа, $f = 0,10$ мм, $N_p = 11,6$ кН, утворення тріщин в розтягнутій зоні (за $P = 4,41$ кН, $M = 1,1$ кН·м);
 б – $P = 11,8$ кН, $M = 2,95$ кН·м, $\sigma^+ = 8,97$ МПа, $\sigma^- = -29,1$ МПа, $f = 0,56$ мм, $N_p = 12,2$ кН, утворення тріщин в стисненій зоні, (за $P = 12,3$ кН, $M = 3,08$ кН·м);
 в – $P = 13,7$ кН, $M = 3,43$ кН·м, $\sigma^+ = 12,4$ МПа, $\sigma^- = -34$ МПа, $f = 1,13$ мм, $N_p = 13$ кН, утворення пластичного шарніру (за $P = 14,2$ кН, $M = 3,55$ кН·м);
 з – $P = 15,2$ кН, $M = 3,8$ кН·м, $\sigma^+ = 15,2$ МПа, $\sigma^- = -41,2$ МПа, $f = 3,03$ мм, $N_p = 15,4$ кН, руйнування

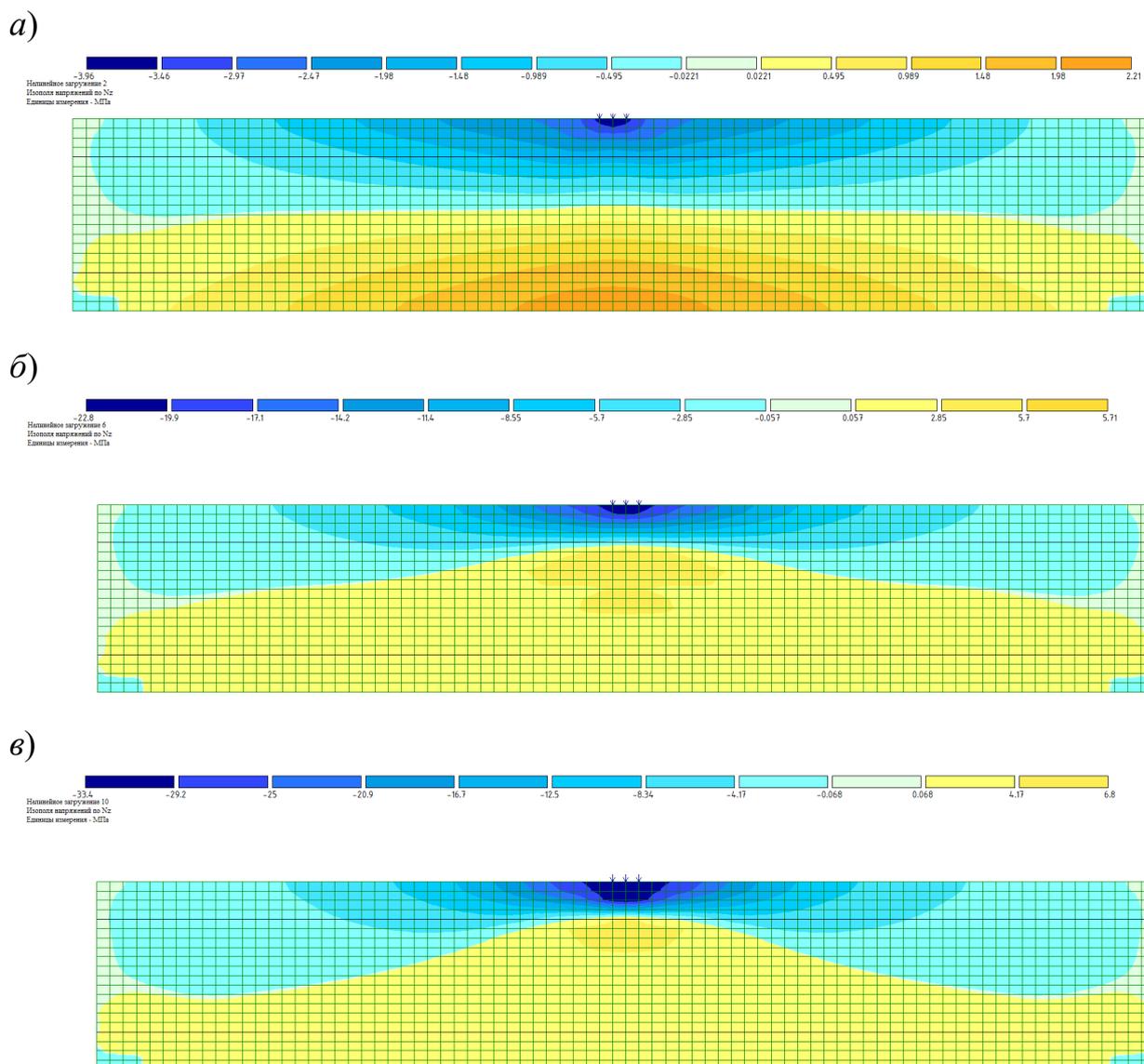


Рис. 3.10 – Поля напряжений в модели зі сталевим дротом, $N_{pk} = 0$ кН:

а – $P = 1,96$ кН, $M = 0,49$ кН·м, $\sigma^+ = 2,21$ МПа; $\sigma^- = -3,96$ МПа, $f = 0,05$ мм,
 $N_p = 0,14$ кН, утворення тріщин в розтягнутій зоні (за $P = 3,43$ кН, $M = 0,86$
кН·м); в – $P = 5,89$ кН, $M = 1,47$ кН·м, $\sigma^+ = 5,71$ МПа, $\sigma^- = -22,8$ МПа, $f = 0,59$
мм, $N_p = 2,52$ кН; утворення тріщин в стисненій зоні (за $P = 7,36$ кН);
б – $P = 9,32$ кН, $M = 2,33$ кН·м, $\sigma^+ = 6,8$ МПа, $\sigma^- = -33,4$ МПа, $f = 3,57$ мм,
 $N_p = 9,8$ кН (руйнування)

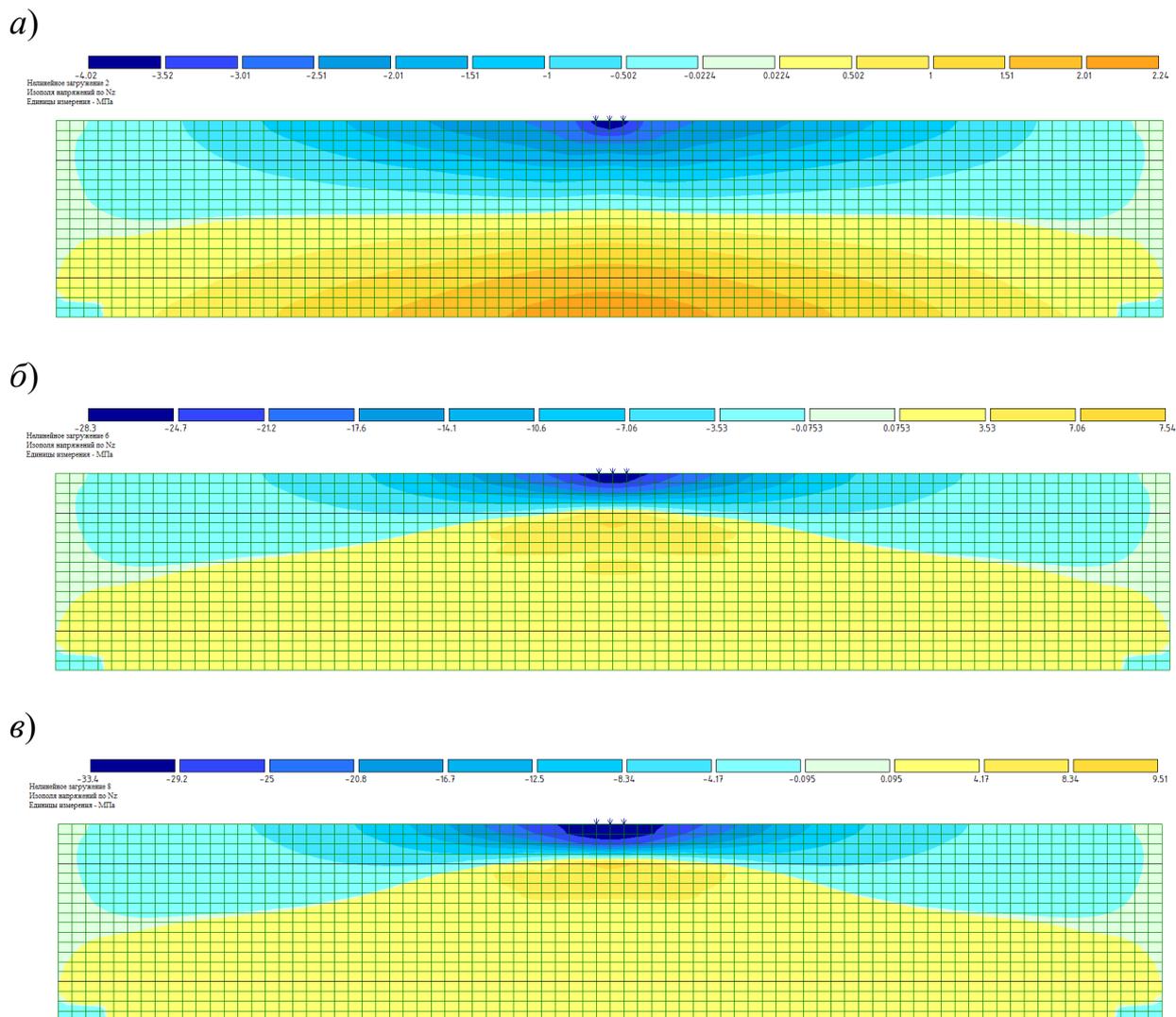


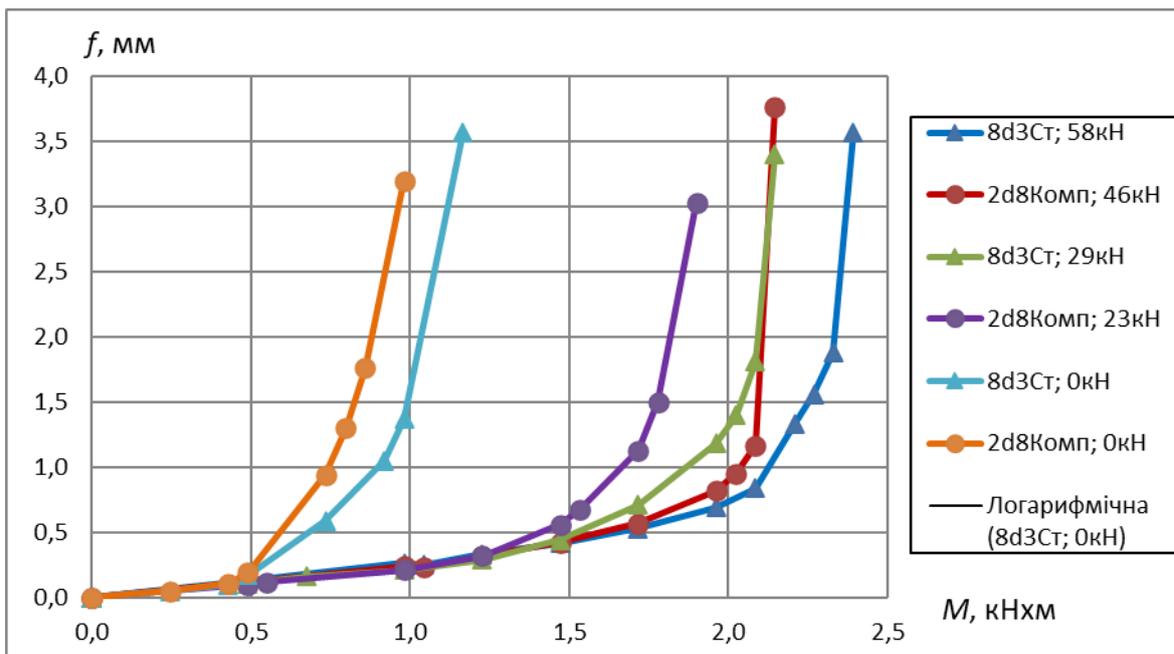
Рис. 3.11 – Поля напряжений в модели зі сталевим дротом, $N_{pk} = 0$ кН:
 а – $P = 1,96$ кН, $M = 0,49$ кН·м, $\sigma^+ = 2,24$ МПа, $\sigma^- = -4,02$ МПа, $f = 0,05$ мм, $N_p = 0,05$ кН, утворення тріщин в розтягнутій зоні (за $P = 3,43$ кН, $M = 0,86$ кН·м);
 б – $P = 5,89$ кН, $M = 1,47$ кН·м, $\sigma^+ = 7,54$ МПа, $\sigma^- = -28,3$ МПа, $f = 0,94$ мм, $N_p = 1,53$ кН, утворення тріщин в стисненій зоні (за $P = 6,38$ кН, $M = 1,6$ кН·м);
 в – $P = 7,85$ кН, $M = 1,96$ кН·м, $\sigma^+ = 9,51$ МПа, $\sigma^- = -33,4$ МПа, $f = 3,2$ мм, $N_p = 4,5$ кН, руйнування

Порівняльний аналіз рис. 3.6–3.11 показує, що характер деформування і розподілу напружень в моделях з композитним армуванням і армуванням сталевим дротом в цілому схожий і в більшому ступені, ніж від типу армування, залежить від величини попереднього натягу арматурного пакету. У випадку композитного армування на всіх стадіях навантаження стиснута зона дещо вужча, а розтягнута ширша, ніж у випадку армування сталевим дротом. Ця різниця збільшується по мірі зниження величини попереднього натягу арматурного пакету. В цілому це свідчить про менші жорсткість і тріщиностійкість моделі з композитною арматурою порівняно з моделлю, армованою сталевим дротом.

За даними про напружено-деформований стан моделей табл. В.1 побудовано діаграми їхнього деформування (рис. 3.12) у вигляді залежностей стріли прогину f від моменту M (рис. 3.12, *a*) та моменту M від стріли прогину f (рис. 3.12, *б*), а також залежності максимального напруження у стиснутій зоні σ від моменту M (рис. 3.13).

Побудовано також залежності моменту від центрального навантаження M (рис. 3.14, *a*) та стріли прогину f (рис. 3.14, *б*), за яких утворюються тріщини в розтягнутій зоні, від зусилля попереднього натягу арматурного пакету N_{pk} в моделях зі сталевим дротом (8dСт) і композитною (2dКомп) арматурою.

а)



б)

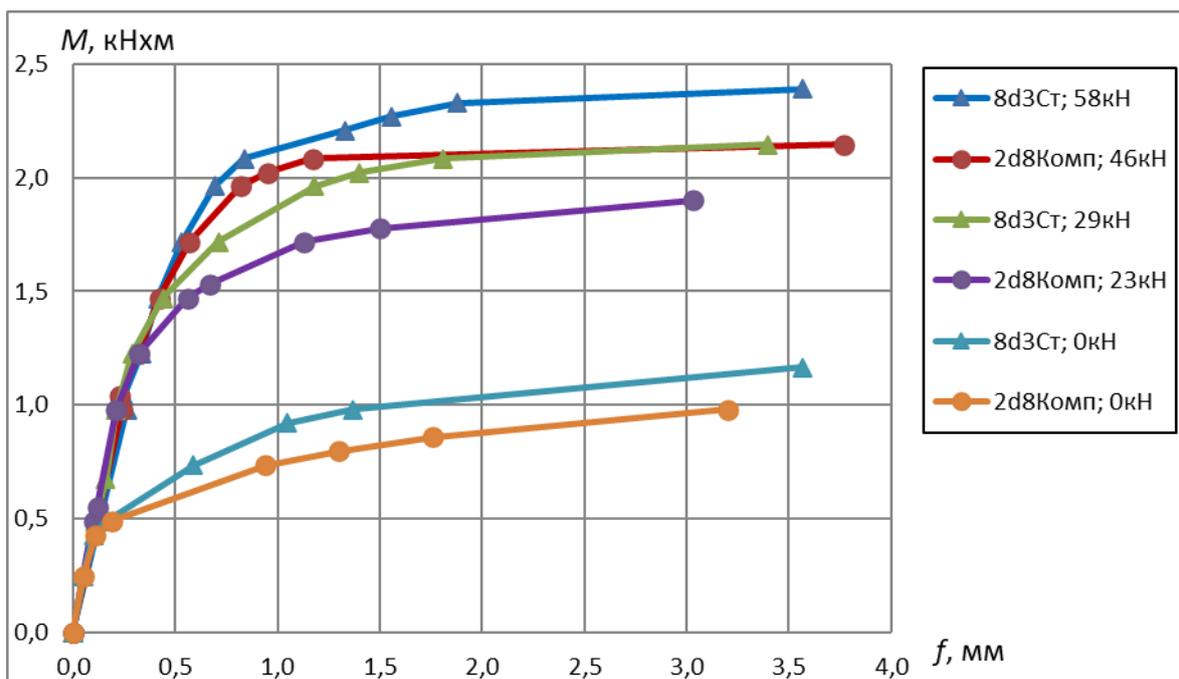


Рис. 3.12 – Отримані розрахунковим експериментом діаграми деформування моделей зі сталевим дротяним 8d3Ст та композитним 2d8Комп армуванням із зусиллям натягу пакету 58; 46; 29; 23; 0 кН: а – залежність стріли прогину f від згинального моменту M ; б – залежність згинального моменту M від стріли прогину f

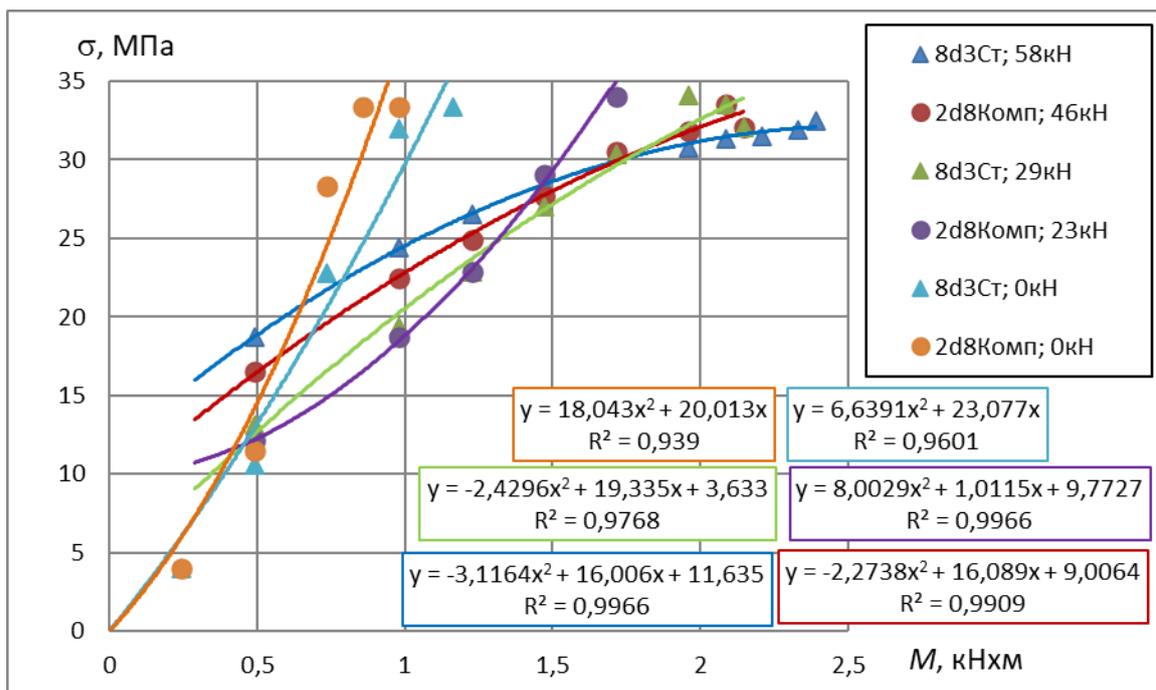
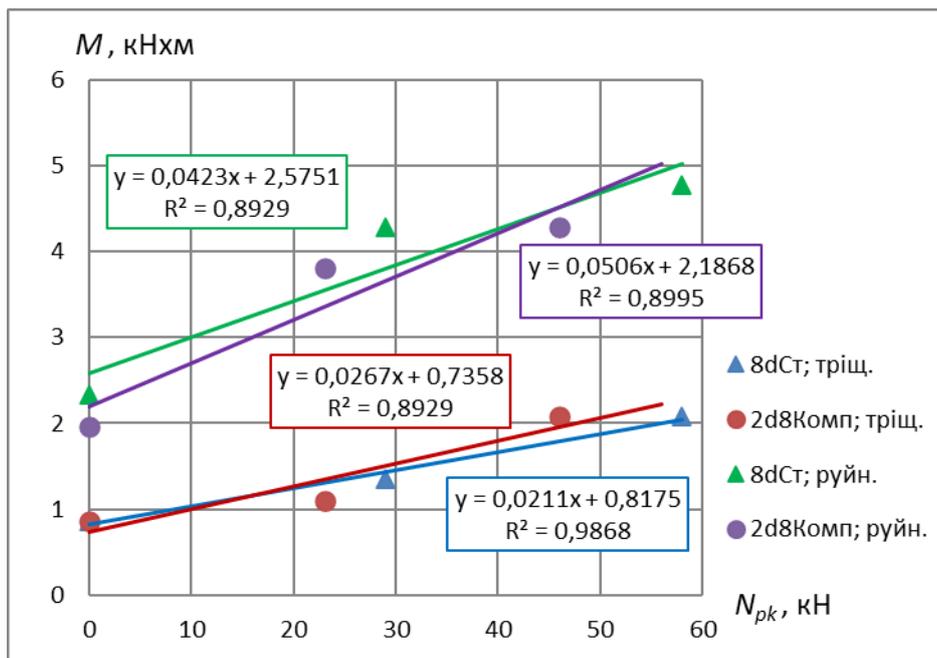


Рис. 3.13 – Отримані розрахунковим експериментом залежності максимального стискаючого напруження у стиснутій зоні σ від згинального моменту M для моделей зі сталевим дротяним 8d3Ст та композитним 2d8Комп армуванням із зусиллям натягу арматурного пакету 58; 46; 29; 23; 0 кН

Наведені на рис. 3.12 залежності схожі на ступеневі (рис. 3.12, а) або логарифмічні (рис. 3.12, б), але засобами Microsoft Excel не апроксимуються. Проте із рис. 3.12 видно, що всі моделі на початковій стадії навантаження зазнають лінійну пружну деформацію, яка після досягнення певного рівня навантаження переходить у нелінійну пластичну стадію. За рис. 3.12, б розраховано величини цих рівнів навантаження для різних моделей. Результати розрахунку наведені у табл. 3.6 і представлені графічно на рис. 3.17 у вигляді залежності рівня навантаження P_n , відповідного переходу від пружної до пластичної деформації (граничі пластичності), від зусилля попереднього натягу арматурного пакету N_{pk} в моделях зі сталевую дротяною і композитною арматурою.

a)



б)

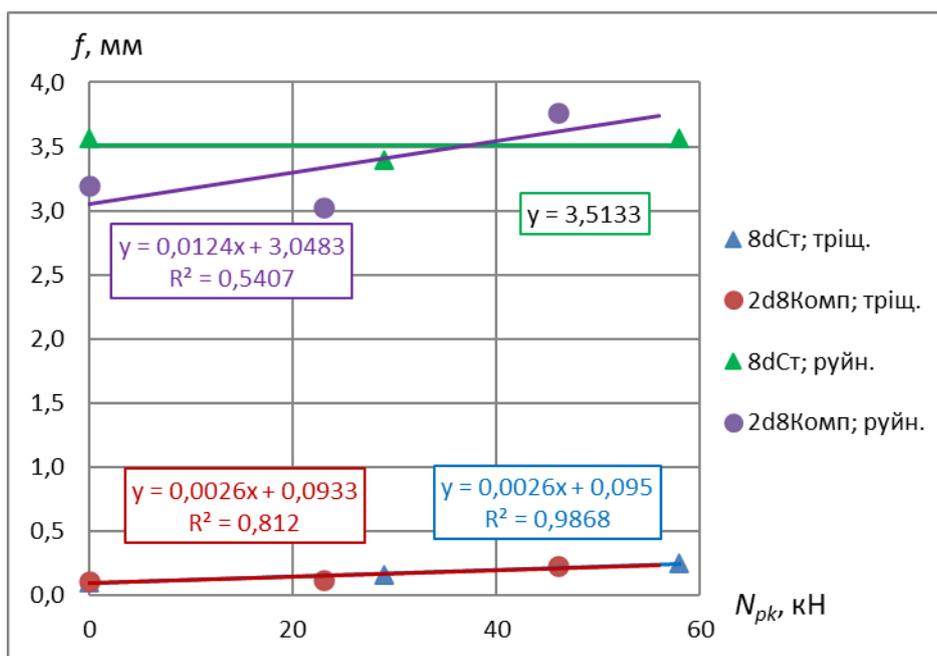


Рис. 3.14 – Залежності від зусилля попереднього натягу арматурного пакету N_{pk} в моделях зі сталевую дротяною (8d3Ст) і композитною (2d8Комп): а – центрального навантаження P , за якого утворюються тріщини в розтягнутій зоні; б – прогину Δ , за якого утворюються тріщини в розтягнутій зоні

Таблиця 3.6 – Величини навантаження, яким відповідають перехід від пружної до пластичної деформації та руйнування моделей

Армування	Натяг арматурного пакету, кН	Границя пластичності моделі, кН	Границя міцності моделі, кН	Рівень навантаження R_H , відповідний переходу до пластичної деформації
8Ø3Ст	58	13	19	0,68
	29	10	17	0,59
	0	3,5	9	0,39
2Ø8Комп	46	12	17	0,71
	23	8	15	0,53
	0	3,5	8	0,44

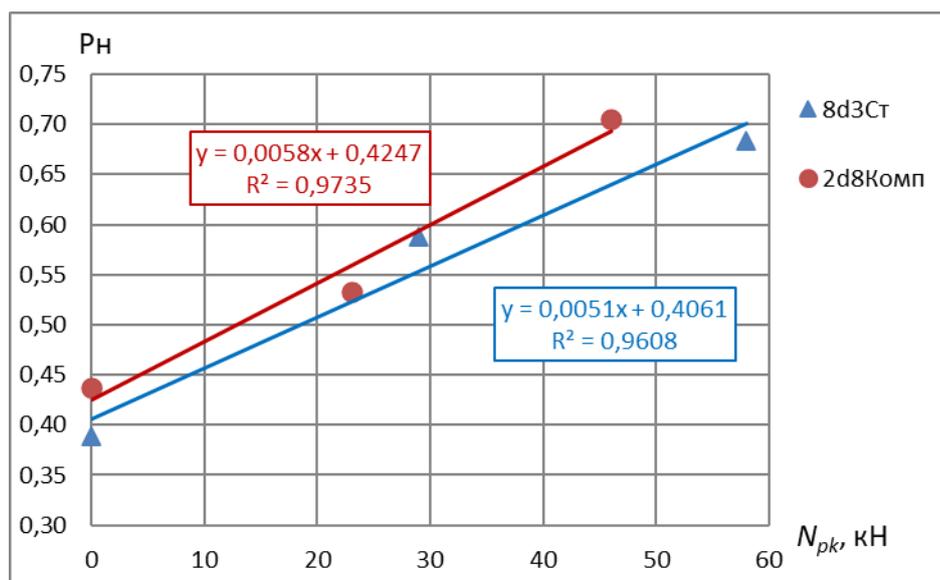


Рис. 3.15 – Залежність рівня навантаження R_H , відповідного переходу від пружної до пластичної деформації від зусилля попереднього натягу арматурного пакету N_{pk} в моделях зі сталеву дротяною (8d3Ст) і композитною (2d8Комп)

Наведені на рис. 3.14 залежності моменту M та стріли прогину f , за яких утворюються тріщини в розтягнутій зоні, від зусилля попереднього натягу арматурного пакету в моделях N_{pk} добре апроксимуються лінійними рівняннями з коефіцієнтами кореляції від 0,9 до 0,99 (в одиничному випадку 0,73). Тангенс кута нахилу відповідних цим рівнянням прямих для моделей з композитною арматурою більший, ніж для моделей зі сталевую арматурою, що свідчить про меншу жорсткість моделей з композитною арматурою.

Наведені на рис. 3.15 залежності рівня навантаження, відповідного переходу від пружної до пластичної деформації від зусилля попереднього натягу арматурного пакету в моделях також добре апроксимуються лінійними рівняннями з коефіцієнтом кореляції 0,98. Прямі близькі між собою, мають близький нахил. Зазначені рівні навантаження для моделей з композитною арматурою дещо більші, ніж для моделей зі сталевую дротяною арматурою.

Аналіз зазначених вище залежностей показує, що деформування моделей по мірі їхнього навантаження та збільшення згинального моменту розвивається стадіями до руйнування:

- 1) Утворення тріщин в розтягнутій зоні;
- 2) Утворення подовжніх тріщин у стиснутій зоні;
- 3) Розвиток тріщин розтягнутої зони до утворення пластичного шарніру (крім моделей без попереднього натягу арматурного пакету);
- 4) Повне руйнування.

У моделі з композитним армуванням з натягом пакету 23 кН моменти є меншими порівняно з моделлю, армованою сталевим дротом з натягом пакету 29 кН:

- 1) Утворення тріщин в розтягнутій зоні – на 18 %;
- 2) Утворення тріщин в стиснутій зоні – на 11 %;
- 3) Утворення пластичного шарніру – на 12 %;
- 4) Руйнування – на 11 %.

Отже, зазначені моменти є меншими на 11–18 %, що корелює з меншим на 21 % попереднім натягом арматурного пакету.

У моделі з композитною арматурою без попереднього натягу моменти є меншими порівняно з моделлю з композитною арматурою з натягом 23 кН:

- 1) Утворення тріщин в розтягнутій зоні – на 22 %;
- 2) Утворення тріщин в стиснутій зоні – на 48 %;
- 4) Руйнування – на 48 %.

Отже, зазначені моменти є меншими на 22–48 %. У моделі з композитною арматурою без натягу стадія 3 утворення пластичного шарніру не відзначалась.

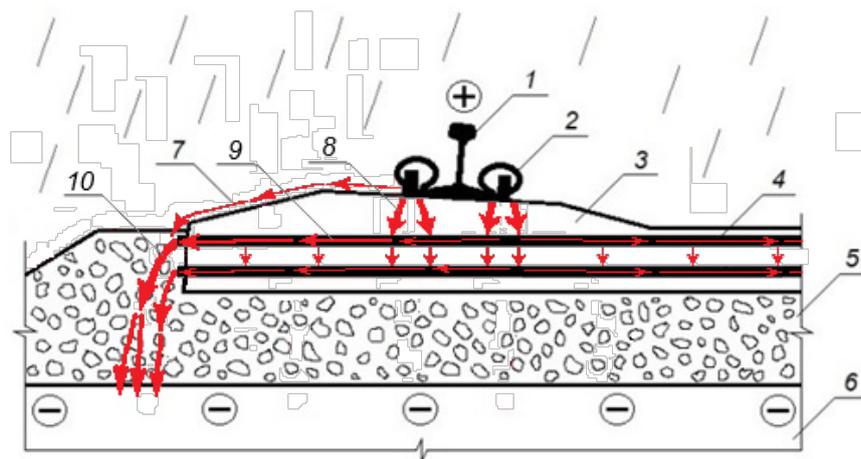
Таким чином за результатами аналізу напружено-деформованого станку моделей можна стверджувати, що на всі моменти, що характеризують міцність та тріщиностійкість моделей, зусилля попереднього натягу арматурного пакету впливає в набагато більшому ступені, ніж вид арматури – сталева дротяна чи композитна.

3.3 Аналіз впливу заміни сталеві дротяної арматури композитною на електрофізичні та електрокорозійні властивості шпал

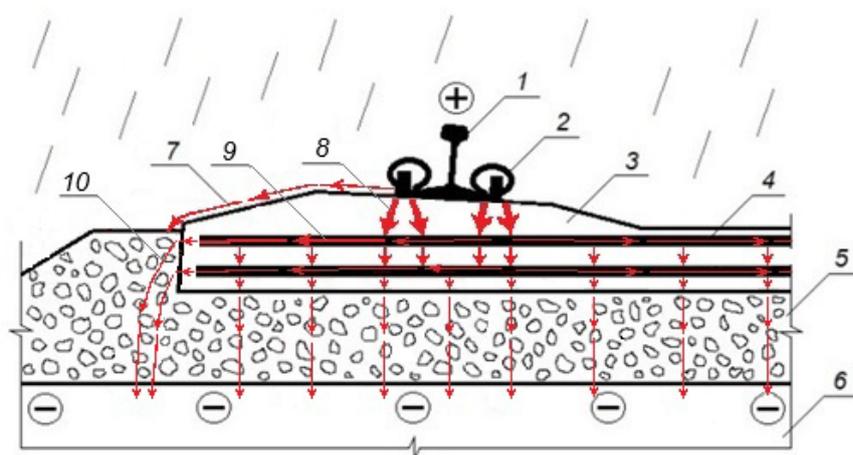
3.3.1 Якісний аналіз впливу заміни сталеві дротяної арматури композитною на електрофізичні та електрокорозійні властивості шпал

Як було показано у п. 1.5, на електрифікованих ділянках залізниць залізобетонні шпали є елементами колії, саме через які здійснюється втрата тягових струмів у вигляді струмів витоку. Проаналізуємо процес стікання постійного струму, ґрунтуючись на схемі, наведеній на рис. 1.11, *а*, крізь стандартні залізобетонні шпали з випусками арматури із торців шпал, шпали із захищеною бетоном арматурою на торцях шпал і шпали із композитною арматурою. Схеми протікання струму крізь зазначені шпали у вологу та дощову погоду наведені на рис. 3.16, *а*, *б*, *в*.

а)



б)



в)

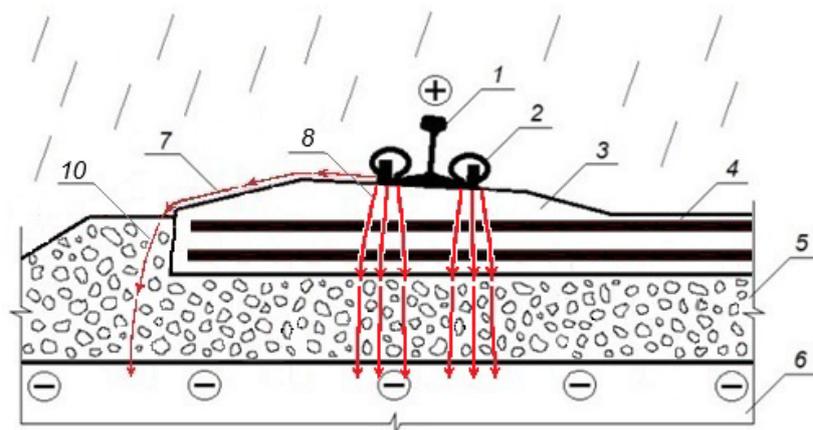


Рис. 3.16 – Схема протікання струму виток у вологу та дощову погоду крізь шпали із бетону: *а* – за сталеву арматуру з її випусками із торців шпал; *б* – за сталеву арматуру, захищеної на торцях шпал бетоном; *в* – з композитною арматурою; 1 – рейка; 2 – рейкове скріплення; 3 – бетон шпали; 4 – арматурний дріт; 5 – баласт; 6 – земляне полотно; 7 – струм виток у поверхню шпали; 8 – струм виток бетоном; 9 – струм виток арматурою; 10 – струм виток баластом в земляне полотно

Стікання буде здійснюватись і плівками вологи на поверхні шпал, проте через те, що ця волога не буде електролітом, оскільки карбонізований поверхневий шар бетону не містить $Ca(OH)_2$, поверхневий струм не буде значним і в подальшому аналізі їм зневажимо.

Як бачимо із рис. 3.16, *а* у стандартних шпалах з випусками арматури із торців струм стікає з анкерів через поровий електроліт бетону (насичений розчин $Ca(OH)_2$) на арматуру, а з її випусків на торцях шпал – через баласт у земляне полотно. В цьому випадку слід очікувати інтенсивної електрокорозії арматури починаючи з кінців шпал. Відносно бетону арматура дрениватиме струми і бетон з урахуванням його високої щільності не зазнаватиме електрокорозії (електроміграційного вилуговування).

Із рис. 3.16, *б* видно, що у випадку захищеної бетоном на торцях шпал арматури стікання струму здійснюватиметься через захисний шар бетону, спричиняючи його електрокорозію – електроміграційне вилуговування. Проте завдяки арматурі струм витoku розподіляється по всій шпалі, його густина не надто велика і завдяки знов таки високій щільності бетону ці процеси протікатимуть повільно.

У випадку заміни сталевих арматури діелектричною композитною струм стікатиме виключно через бетон (рис. 3.16, *в*). Через те, що арматура не дрениє і не розподіляє струм, слід очікувати певних електрокорозійних процесів у бетоні, яким можливо запобігти підвищенням щільності бетону.

Результати цього аналізу узагальнені у табл. 3.7.

Таблиця 3.7 – Якісні електрофізичні та електрокорозійні властивості шпал з різним армуванням

Конструкція шпал	Електрофізичні показники шпал між анкером і баластом		Втрати тягового струму, струми витоку	Електрокорозія	
	електропровідність	електричний опір		арматури	бетону
Стандартна залізо-бетонна з випусками арматури на торцях (рис. 3.16, а)	Висока	Низький	Високі	Інтенсивна	Відсутня
Залізобетонна із захищеною бетоном арматурою на торцях (рис. 3.16, б)	Помірна	Помірний	Помірні	Помірна	Мінімальна
З композитним армуванням (рис. 3.16, в)	Низька	Низька	Низькі	Відсутня	Помірна

3.3.2 Кількісний аналіз впливу заміни сталеві дротяної арматури композитною на електрофізичні властивості шпал

Виконаємо кількісний аналіз впливу заміни сталеві дротяної арматури в залізобетонній шпалі композитною арматурою на її електрофізичні властивості, зокрема, електричний опір, який визначає також електрокорозійні процеси.

Кількісно цей вплив охарактеризуємо коефіцієнтом збільшення електричного опору за рахунок цієї заміни:

$$K_e = \frac{R_{шк}}{R_{шс}}, \quad (3.3)$$

Електричний опір залізобетонних шпал нормується національним стандартом ДСТУ Б.В.2.6-209 [12, 13]. Для визначення нормованих величин електричного опору ДСТУ встановлено стандартну методику вимірювань за схемами наведеними на рис. 3.17.

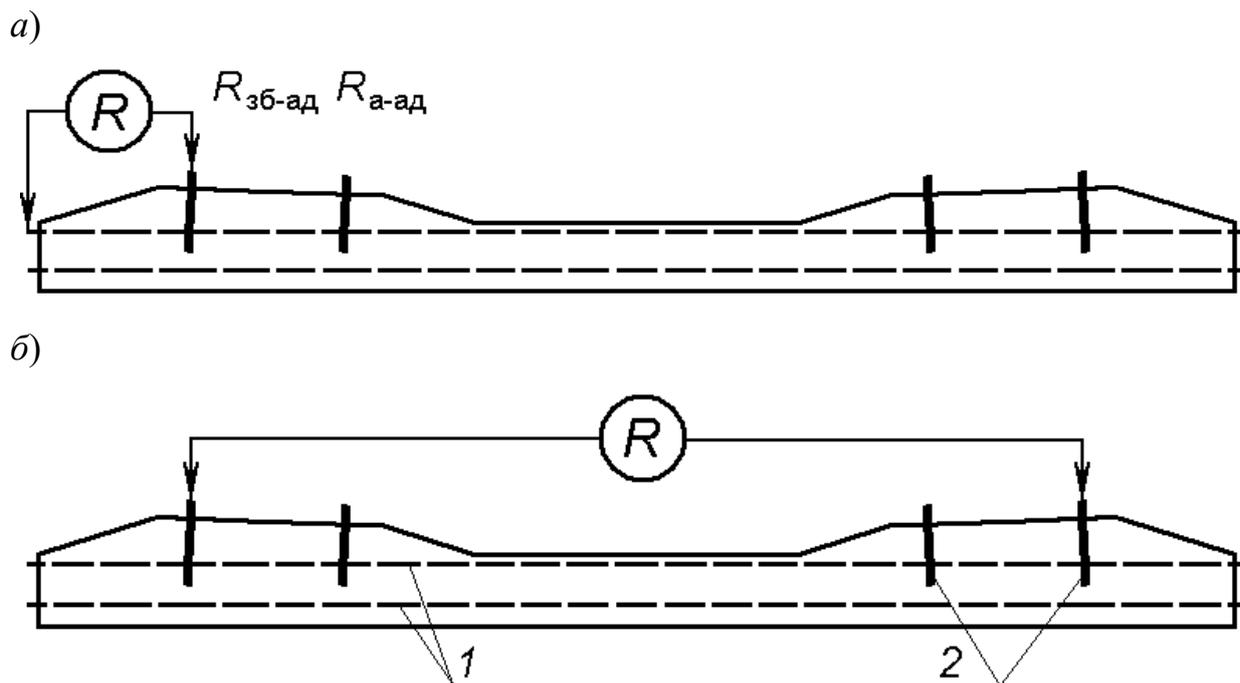


Рис. 3.17 – Стандартний метод контролю електричного опору залізобетонних шпал. Схеми вимірювання електричного опору: *а* – між закладними болтами (анкерами) різних рейкових ниток; *б* – між закладним болтом (анкером) і виступаючими кінцями арматурного дроту; *1* – арматурний дріт; *2* – закладні болти (анкери)

Нормовані величини електричного опору шпал:

- між крайнім анкером $R_{а-ад}$ (закладним болтом $R_{зб-ад}$) і торцевою гранню шпали з випусками арматури – не менше 0,26 (0,165) кОм;
- між крайніми анкерами (закладними болтами) – не менше 0,52 (0,33) кОм;

Перший із цих електричних опорів забезпечує запобігання втрати тягових струмів і утворення струмів витоку, другий – надійність роботи сигналізації, централізації і автоблокування (СЦБ).

Загальний електричний опір шпали між крайнім анкером і крайньою гранню з випусками арматури (рис. 3.17, *а*) можна представити у вигляді схеми, наведеної на рис. 3.18, *а*, а загальний електричний опір шпали між крайніми анкерами (рис. 3.17, *б*) – у вигляді схеми, наведеної на рис. 3.18, *б*.

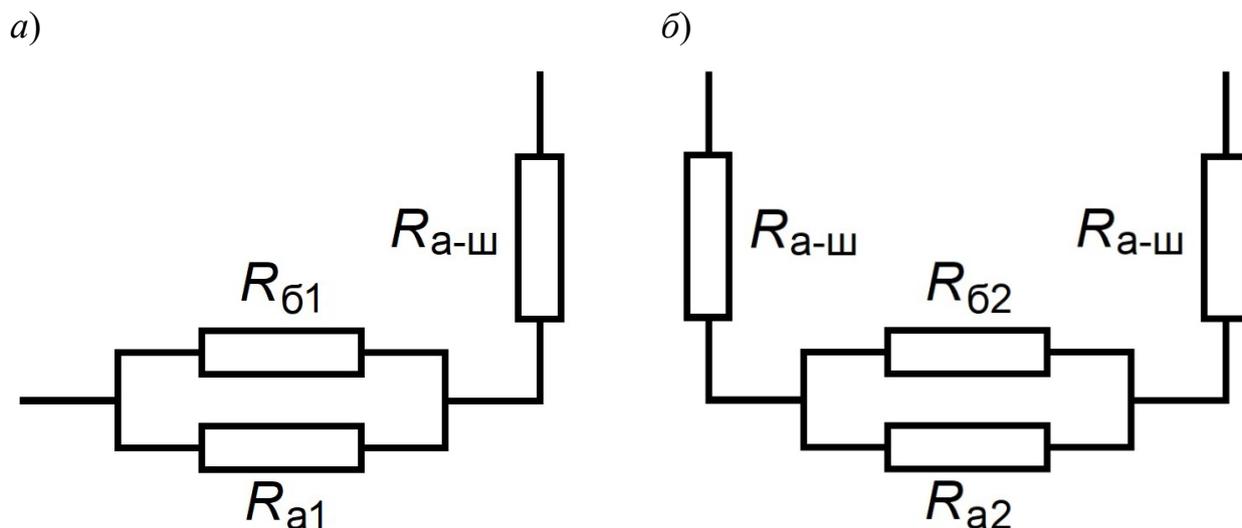


Рис. 3.18 – Схеми електричного опору шпал із бетону з арматурою: *a* – між анкером і торцевою гранню шпала з виступаючими кінцями арматури; *б* – між крайніми анкерами різних рейкових ниток

Згідно зі схемою рис. 3.18, *a* загальний електричний опір шпала між анкером і торцевою гранню шпала з виступаючими кінцями арматури складе:

- для шпала зі сталевую дотяною арматурою:

$$R_{шс1} = R_{ан-ш} + \frac{R_{б1} R_{ак1}}{R_{б1} + R_{ак1}}, \quad (3.4)$$

- для шпала з композитною арматурою:

$$R_{шк1} = R_{ан-ш} + \frac{R_{б1} R_{ак1}}{R_{б1} + R_{ак1}}. \quad (3.5)$$

де $R_{ан-ш}$ – перехідний електричний опір між анкером і шпалою, для сухої погоди приймемо рівним мінімальній нормованій величині електричного опору між крайнім анкером і торцевою гранню шпала з випусками арматури 260 Ом;

$R_{б1}$ – електричний опір бетону шпала між анкером і торцевою гранню шпала з виступаючими кінцями арматури, Ом;

R_{ac1} – електричний опір сталевій дротяній арматурі між анкером і торцевою гранню шпали з виступаючими кінцями арматури, Ом;

$R_{ак1}$ – електричний опір композитній арматурі між анкером і торцевою гранню шпали з виступаючими кінцями арматури, Ом.

$R_{б1}$, R_{ac1} , R_{ac2} знайдемо із величин питомого електричного опору бетону, сталевій дротяній й композитній арматурі, а також геометричних характеристик шпали та її армування (рис. 1.2, 3.19).

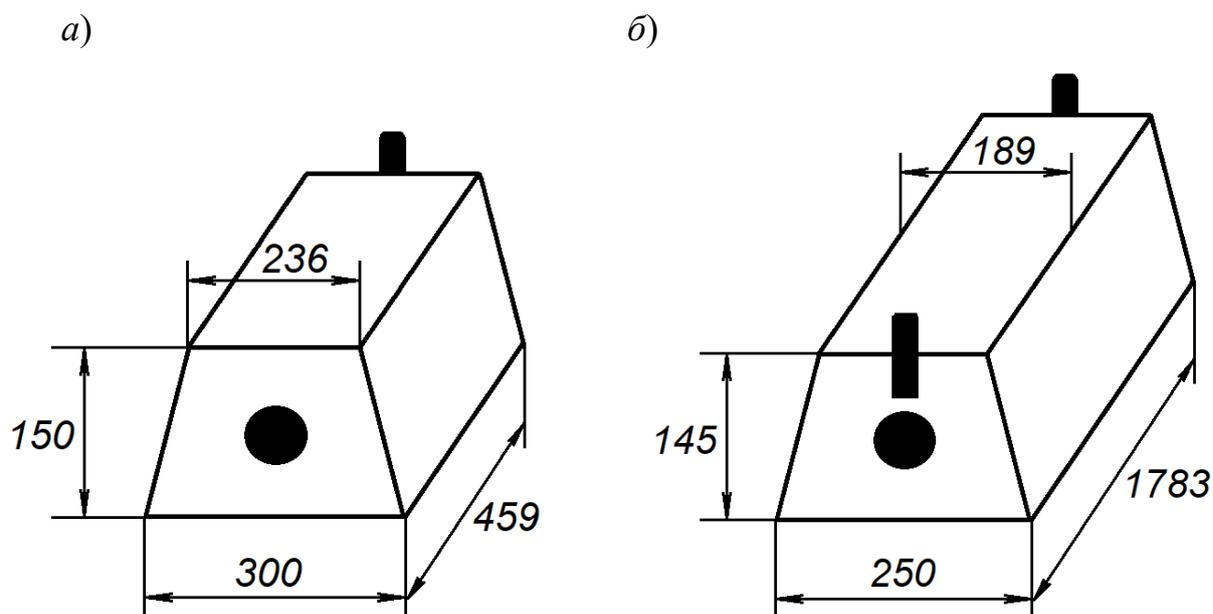


Рис. 3.19 – Схеми шпали для визначення електричного опору: *a* – між анкером і торцевою гранню шпали з виступаючими кінцями арматури; *б* – між крайніми анкерами різних рейкових ниток.

Арматура умовно показана у вигляді одного стержня з площею перерізу, рівною сумарній площі перерізів усіх дротин/стержнів

$$R_{б1} = \frac{\rho_{б1} l_1}{S_{б1}}, \quad (3.6)$$

$$R_{ac1} = \frac{4\rho_{ac} l_1}{n_{ac} \pi d_{ac}^2}, \quad (3.7)$$

$$R_{ак1} = \frac{4\rho_{ак} l_1}{n_{ак} \pi d_{ак}^2}, \quad (3.8)$$

де ρ_b – питомий електричний опір бетону, прийmemo рівним гранично допустимій величині 100 Ом·м;

l_1 – відстань між крайнім анкером і торцевою гранню шпали з випусками арматури (рис. 3.19, *a*), 0,459 м;

S_{b1} – мінімальна площа поперечного перерізу шпали – на її торцевій грані, обрахована як площа трапеції згідно рис. 3.19, *a*

$$S_{b1} = 0,15 \cdot (0,3 + 0,236) / 2 = 4,02 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2;$$

ρ_{ac} – питомий електричний опір сталевій дотяної арматури, $0,12 \cdot 10^{-6}$ Ом·м;

n_{ac} – кількість дроту сталевій арматури, 44;

d_{ac} – діаметр сталевого дроту, $3 \cdot 10^{-3}$ м;

ρ_{ak} – питомий електричний опір композитної епоксидно-базальтової арматури, $1 \cdot 10^{12}$ Ом·м;

n_{ak} – кількість стержнів композитної арматури, 8;

d_{ak} – діаметр композитної арматури, $8 \cdot 10^{-3}$ м.

Підставивши у (3.6), (3.7), (3.8) вказані значення, знайдемо величини R_{b1} ,

R_{ac1} , R_{ak1} :

$$R_{b1} = \frac{100 \cdot 0,459}{4,02 \cdot 10^{-2}} = 1,141 \cdot 10^3 \text{ Ом};$$

$$R_{ac1} = \frac{4 \cdot 0,12 \cdot 10^{-6} \cdot 0,459}{44\pi \cdot (3 \cdot 10^{-3})^2} = 1,771 \cdot 10^{-4} \text{ Ом};$$

$$R_{ak1} = \frac{4 \cdot 1 \cdot 10^{12} \cdot 0,459}{8\pi \cdot (8 \cdot 10^{-3})^2} = 1,141 \cdot 10^3 \text{ Ом}.$$

Підставивши визначені величини у (3.4) і (3.5), отримаємо:

- для шпали зі сталевією дотяною арматурою:

$$R_{\text{шк1}} = 260 + \frac{1,141 \cdot 10^3 \times 1,771 \cdot 10^{-4}}{1,141 \cdot 10^3 + 1,771 \cdot 10^{-4}} \approx 260 \text{ Ом};$$

- для шпали з композитною арматурою:

$$R_{\text{шк1}} = 260 + \frac{1,141 \cdot 10^3 \times 1,141 \cdot 10^3}{1,141 \cdot 10^3 + 1,141 \cdot 10^3} \approx 1401 \text{ Ом}.$$

В цьому випадку коефіцієнт збільшення електричного опору шпали за рахунок заміни сталевий дротяної арматури композитною за (3.3) складе:

$$K_e = 1401/260 = 5,39.$$

Отже, електричний опір шпали збільшується у 4,2 рази.

Припустимо, що у вологу погоду перехідний електричний опір між анкером і шпалою знижується на 50 %. Припустимо також, що електричний опір бетону всередині шпали не змінюється. В цьому випадку (3.4) і (3.5) набудуть вигляд:

- для шпали зі сталевий дротяною арматурою:

$$R_{\text{шк1}} = 0,5R_{\text{ан-ш}} + \frac{R_{\text{б1}}R_{\text{ак1}}}{R_{\text{б1}} + R_{\text{ак1}}}, \quad (3.9)$$

- для шпали з композитною арматурою:

$$R_{\text{шк1}} = 0,5R_{\text{ан-ш}} + \frac{R_{\text{б1}}R_{\text{ак1}}}{R_{\text{б1}} + R_{\text{ак1}}}. \quad (3.10)$$

Підставивши у (3.8), (3.9) відповідні величини, отримаємо:

- для шпали зі сталевий дротяною арматурою:

$$R_{\text{шс1}} = 0,5 \cdot 260 + \frac{1,141 \cdot 10^3 \times 1,771 \cdot 10^{-4}}{1,141 \cdot 10^3 + 1,771 \cdot 10^{-4}} \approx 130 \text{ Ом};$$

- для шпали з композитною арматурою:

$$R_{\text{шк1}} = 0,5 \cdot 260 + \frac{1,141 \cdot 10^3 \times 1,141 \cdot 10^3}{1,141 \cdot 10^3 + 1,141 \cdot 10^3} \approx 1271 \text{ Ом}.$$

В цьому випадку коефіцієнт збільшення електричного опору шпали за рахунок заміни сталевий дротяної арматури композитною за (3.3) складе:

$$K_e = 1271/130 = 9,78.$$

Отже, електричний опір шпали збільшується також у 9,8 раз.

Припустимо, що у дощову погоду перехідний електричний опір між анкером і шпалою знижується до мінімальної величини, яку приймемо рівною нулю. Припустимо також, що електричний опір бетону всередині шпали не змінюється. В цьому випадку (3.4) і (3.5) набудуть вигляд:

- для шпали зі сталевий дротяною арматурою:

$$R_{\text{шс1}} = \frac{R_{\text{б1}} R_{\text{ас1}}}{R_{\text{б1}} + R_{\text{ас1}}}, \quad (3.11)$$

- для шпали з композитною арматурою:

$$R_{\text{шк1}} = \frac{R_{\text{б1}} R_{\text{ак1}}}{R_{\text{б1}} + R_{\text{ак1}}}. \quad (3.12)$$

Підставивши у (3.8), (3.9) відповідні величини, отримаємо:

- для шпали зі сталевий дротяною арматурою:

$$R_{шс1} = \frac{1,141 \cdot 10^3 \times 1,771 \cdot 10^{-4}}{1,141 \cdot 10^3 + 1,771 \cdot 10^{-4}} \approx 1,771 \cdot 10^{-4} \text{ Ом};$$

- для шпали з композитною арматурою:

$$R_{шк1} = \frac{1,141 \cdot 10^3 \times 1,141 \cdot 10^3}{1,141 \cdot 10^3 + 1,141 \cdot 10^3} \approx 571 \text{ Ом}.$$

В цьому випадку коефіцієнт збільшення електричного опору шпали за рахунок заміни сталевий дротяної арматури композитною за (3.3) складе:

$$K_e = 571 / 1,771 \cdot 10^{-4} = 3,224 \cdot 10^6,$$

або більше на 6 порядків.

Виконаємо аналогічний розрахунок для електричного опору шпали між крайніми анкерами (рис. 3.17, б, 3.18, б, 3.19, б).

Згідно зі схемою рис. 3.18, б загальний електричний опір шпали між крайніми анкерами складе:

- для шпали зі сталевую дротяною арматурою:

$$R_{шс2} = 2R_{ан-ш} + \frac{R_{б2}R_{ак2}}{R_{б2}+R_{ак2}}, \quad (3.13)$$

- для шпали з композитною арматурою:

$$R_{шк2} = 2R_{ан-ш} + \frac{R_{б2}R_{ак2}}{R_{б2}+R_{ак2}}. \quad (3.14)$$

$R_{б2}$, $R_{ак2}$, $R_{ак2}$ знайдемо із величин питомого електричного опору бетону, сталевий дротяної й композитної арматури, геометричних характеристик шпали та її армування (рис. 1.2, 3.19, б):

$$R_{\delta 2} = \frac{\rho_{\delta} l_2}{S_{\delta 2}}; \quad (3.15)$$

$$R_{ac1} = \frac{4\rho_{ac} l_2}{n_{ac} \pi d_{ac}^2}; \quad (3.16)$$

$$R_{ak1} = \frac{4\rho_{ak} l_2}{n_{ak} \pi d_{ak}^2}; \quad (3.17)$$

де l_2 – відстань між крайніми анкерами шпали (рис. 3.19, б), 1,783 м;

$S_{\delta 1}$ – мінімальна площа поперечного перерізу шпали між анкерами (посередині шпали), обрахована як площа трапеції згідно рис. 3.19, б

$$S_{\delta 2} = 0,145 \cdot (0,25 + 0,189) / 2 = 3,183 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2;$$

інші позначення відповідають позначенням до (3.6), (3.7), (3.8).

Підставивши у (3.15), (3.16), (3.17) вказані значення, знайдемо величини $R_{\delta 2}$, R_{ac2} , R_{ak2} :

$$R_{\delta 2} = \frac{100 \cdot 1,783}{3,183 \cdot 10^{-2}} = 5,602 \cdot 10^3 \text{ Ом};$$

$$R_{ac2} = \frac{4 \cdot 0,12 \cdot 10^{-6} \cdot 1,783}{44\pi \cdot (3 \cdot 10^{-3})^2} = 6,879 \cdot 10^{-4} \text{ Ом};$$

$$R_{ak2} = \frac{4 \cdot 1 \cdot 10^{12} \cdot 1,783}{8\pi \cdot (8 \cdot 10^{-3})^2} = 4,434 \cdot 10^3 \text{ Ом}.$$

Підставивши визначені величини у (3.10) і (3.11), отримаємо:

- для шпали зі сталевую дротяною арматурою:

$$R_{шс2} = 2 \cdot 260 + \frac{5,602 \cdot 10^3 \times 6,879 \cdot 10^{-4}}{5,602 \cdot 10^3 + 6,879 \cdot 10^{-4}} \approx 520 \text{ Ом};$$

- для шпали з композитною арматурою:

$$R_{\text{шк2}} = 2 \cdot 260 + \frac{5,602 \cdot 10^3 \times 4,434 \cdot 10^3}{5,602 \cdot 10^3 + 4,434 \cdot 10^3} \approx 2995 \text{ Ом.}$$

В цьому випадку коефіцієнт збільшення електричного опору шпали за рахунок заміни сталевий дрітної арматури композитною за (3.3) складе:

$$K_e = 2995/520 = 5,76.$$

Отже, електричний опір шпали збільшується у 5,8 раз.

Використовуючи ті ж самі припущення, що і для електричного опору між крайнім анкером і торцевою гранню шпали з випусками арматури, визначимо електричний опір шпал між крайніми анкерами різних рейкових ниток у вологу та дощову погоду.

Для випадку вологої погоди (3.13), (3.14) набудуть вигляд:

- для шпали зі сталевий дрітної арматурою:

$$R_{\text{шк2}} = 0,5 \cdot 2R_{\text{ан-ш}} + \frac{R_{\text{б2}}R_{\text{ак2}}}{R_{\text{б2}}+R_{\text{ак2}}}, \quad (3.18)$$

- для шпали з композитною арматурою:

$$R_{\text{шк2}} = 0,5 \cdot 2R_{\text{ан-ш}} + \frac{R_{\text{б2}}R_{\text{ак2}}}{R_{\text{б2}}+R_{\text{ак2}}}. \quad (3.19)$$

Підставивши визначені величини у (3.18) і (3.19), отримаємо:

- для шпали зі сталевий дрітної арматурою:

$$R_{\text{шк2}} = 0,5 \cdot 2 \cdot 260 + \frac{5,602 \cdot 10^3 \times 6,879 \cdot 10^{-4}}{5,602 \cdot 10^3 + 6,879 \cdot 10^{-4}} \approx 260 \text{ Ом;}$$

- для шпали з композитною арматурою:

$$R_{\text{шк2}} = 0,5 \cdot 2 \cdot 260 + \frac{5,602 \cdot 10^3 \times 4,434 \cdot 10^3}{5,602 \cdot 10^3 + 4,434 \cdot 10^3} \approx 2735 \text{ Ом.}$$

В цьому випадку коефіцієнт збільшення електричного опору шпали за рахунок заміни сталевий дотяної арматури композитною за (3.3) складе:

$$K_e = 2735/260 = 10,52.$$

Отже, електричний опір шпали збільшується у 10,5 раз.

Для випадку дощової погоди (3.13), (3.14) набудуть вигляд:

- для шпали зі сталевий дотяною арматурою:

$$R_{\text{шк2}} = \frac{R_{\text{б2}} R_{\text{ак2}}}{R_{\text{б2}} + R_{\text{ак2}}}, \quad (3.20)$$

- для шпали з композитною арматурою:

$$R_{\text{шк2}} = \frac{R_{\text{б2}} R_{\text{ак2}}}{R_{\text{б2}} + R_{\text{ак2}}}. \quad (3.21)$$

Підставивши у (3.20), (3.21) відповідні величини, отримаємо:

- для шпали зі сталевий дотяною арматурою:

$$R_{\text{шк2}} = \frac{5,602 \cdot 10^3 \times 6,879 \cdot 10^{-4}}{5,602 \cdot 10^3 + 6,879 \cdot 10^{-4}} \approx 6,879 \cdot 10^{-4} \text{ Ом;}$$

- для шпали з композитною арматурою:

$$R_{\text{шк2}} = \frac{5,602 \cdot 10^3 \times 4,434 \cdot 10^3}{5,602 \cdot 10^3 + 4,434 \cdot 10^3} \approx 2475 \text{ Ом.}$$

В цьому випадку коефіцієнт збільшення електричного опору шпали за рахунок заміни сталевий дротяної арматури композитною за (3.3) складе:

$$K_e = 2475/6,879 \cdot 10^{-4} = 3,598 \cdot 10^6,$$

або також більше на 6 порядків.

Результати розрахунків узагальнені у табл. 3.8, із якої бачимо, що заміна сталевий дротяної арматури композитною збільшує електричний опір шпал для сухих погодних умов – у 5,4–5,8 раз, для умов вологої погоди – у 9,8–10,5 раз, а для умов дощовий погоди – на 6 порядків.

Таблиця 3.8 – Розрахункові величини електричного опору шпал із бетону зі сталевий дротяною та композитною арматурою

Шпала з армуванням	Електричний опір, Ом					
	Між крайнім анкером і торцевою гранню з випусками арматури			Між крайніми анкерами рейкових ниток		
	в суху погоду	у вологу погоду	у дощову погоду	в суху погоду	у вологу погоду	у дощову погоду
44Ø3Вр1400	260	130	$1,77 \cdot 10^{-4}$	520	260	$6,88 \cdot 10^{-4}$
8Ø8Композитна	1401	1271	571	2995	2735	2475
Коефіцієнт збільшення електричного опору шпали за рахунок заміни сталевий дротяної арматури композитною K_e	5,4	9,8	$3,2 \cdot 10^6$	5,8	10,5	$3,6 \cdot 10^6$

Висновки за розділом 3

1. Виконано дослідження впливу заміни сталевий арматури композитною на напружено-деформований стан шпал методом скінчених елементів.

1.1. В результаті аналізу НДС під навантаженнями, що відповідають експлуатаційним, встановлено, що у середньому перерізі за однакового попереднього натягу арматурного пакету 353 кН максимальні напруження складають для шпал з композитною та сталевий дротяною арматурою: стискаючі – 16,1 і 16,7 МПа; розтягувальні – 1,1 і 0,12 МПа. Максимальні розтягувальні напруження в бетоні шпали з композитною арматурою у середньому перерізі близько 1,1 МПа перевищують напруження у шпалі зі сталевий арматурою 0,12 МПа на порядок, хоча й не спричиняють утворення тріщин в бетоні. Всі напруження менші границі міцності бетону на стиск і розтяг, умови міцності та тріщиностійкості для середнього перерізу виконуються.

1.2. Встановлено, що зниження попереднього напруження композитної арматури на 25 і 50 % призводить до незначного збільшення максимальних стискаючих напружень, проте розтягувальні напруження і в підрейковому, і в середньому перерізі збільшуються до 6,2 і 7,1 %, відповідно, що перевищує границю міцності на розтяг та спричиняє утворення тріщин у розтягнутих зонах підрейкових і середнього перерізу. З подальшим зниженням попереднього напруження не призводить до суттєвого збільшення розтягувальних напружень.

1.3 Встановлено, що на напружено-деформований стан шпали в більшому ступені впливає величина попереднього натягу арматурного пакету, в меншому ступені – вид арматури. Проте з композитною арматурою погіршується тріщиностійкість шпали. Зниження попереднього напруження композитної арматури не призведе до руйнування бетону в стиснутих зонах, проте обумовить роботу шпал із тріщинами у розтягнутих зонах.

2. Виконано дослідження впливу заміни сталевий арматури композитною на напружено-деформований стан моделей шпал, призначених для натурних експериментальних досліджень, методом скінчених елементів.

2.1 В результаті аналізу напружено-деформованого стану моделей по мірі їх навантаження до руйнування встановлено, що деформування моделей по мірі навантаження та збільшення згинального моменту розвивається стадіями до руйнування: утворення тріщин в розтягнутій зоні; утворення подовжніх тріщин у стиснутій зоні; розвиток тріщин розтягнутої зони до утворення пластичного шарніру (крім моделей без попереднього натягу арматурного пакету); повне руйнування.

2.2 Встановлено, що у моделі з композитним армуванням з натягом пакету 23 кН моменти є меншими порівняно з моделлю, армованою сталевим дротом з натягом пакету 29 кН: утворення тріщин в розтягнутій зоні – на 18 %; утворення тріщин в стиснутій зоні – на 11 %; утворення пластичного шарніру – на 12 %; руйнування – на 11 %. Зазначені моменти є меншими на 11–18 %, що корелює з меншим на 21 % попереднім натягом арматурного пакету.

2.3 Встановлено, що у моделі з композитною арматурою без попереднього натягу моменти є меншими порівняно з моделлю з композитною арматурою з натягом 23 кН: утворення тріщин в розтягнутій зоні – на 22 %; утворення тріщин в стиснутій зоні – на 48 %; руйнування – на 48 %. Зазначені моменти є меншими на 22–48 %. У моделі з композитною арматурою без натягу стадія 3 утворення пластичного шарніру не відзначалась.

2.4 Встановлено, що на всі моменти, що характеризують міцність та тріщиностійкість моделей, зусилля попереднього натягу арматурного пакету впливає в набагато більшому ступені, ніж вид арматури – сталева дротяна чи композитна.

3. Виконано аналіз впливу заміни сталевий дротяної арматури композитною на електрофізичні та електрокорозійні властивості шпал.

3.1 Показано, що у стандартних шпалах з випусками арматури із торців струм стікає з анкерів через поровий електроліт бетону (насичений розчин $Ca(OH)_2$) на арматуру, а з її випусків на торцях шпал – через баласт у земляне полотно. В цьому випадку слід очікувати інтенсивної електрокорозії арматури починаючи з кінців шпал. Відносно бетону арматура дрениватиме струми і бетон з урахуванням його високої щільності не зазнаватиме електрокорозії (електроміграційного вилуговування). У випадку захищеної бетоном на торцях шпал арматури стікання струму здійснюватиметься через захисний шар бетону, спричиняючи його електрокорозію – електроміграційне вилуговування. Проте завдяки арматурі струм витоку розподіляється по всій шпалі, його густина не надто велика і завдяки знов таки високій щільності бетону ці процеси протікатимуть повільно. У випадку заміни сталеві арматури діелектричною композитною струм стікатиме виключно через бетон. Через те, що арматура не дрениє і не розподіляє струм, слід очікувати певних електрокорозійних процесів у бетоні, яким можливо запобігти підвищенням щільності бетону.

3.2 Розроблено схеми електричного опору шпал зі сталеві дротяною та композитною арматурою, складені паралельними та послідовними з'єднаннями елементів шпали. В результаті розрахунків за цими схемами встановлено, що заміна сталеві дротяної арматури композитною збільшує електричний опір шпал для сухих погодних умов – у 5,4–5,8 раз, для умов вологої погоди – у 9,8–10,5 раз, а для умов дощові погоди – на 6 порядків.

РОЗДІЛ 4

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ШПАЛ ІЗ БЕТОНУ ЗІ СТАЛЕВОЮ ДРОТЯНОЮ ТА КОМПОЗИТНОЮ АРМАТУРОЮ

4.1 Дослідження міцності, жорсткості та тріщиностійкості шпал на моделях

Результати натурального експерименту з навантаження моделей шпал із бетону зі сталевую та композитною, виконаного за методикою, наведеною у п. 2.1.7, узагальнено разом із результатами розрахункового експерименту (п. 3.2) на рис. 4.1–4.4 і в табл. 4.1.

В результаті розрахункового експерименту встановлено, що по мірі навантаження всіх моделей та збільшення моменту від нього деформування розвивається до руйнування стадіями:

- 1) Утворення тріщин в розтягнутій зоні;
- 2) Утворення подовжніх тріщин у стиснутій зоні;
- 3) Розвиток тріщин розтягнутої зони до утворення пластичного шарніру (крім моделі з композитною арматурою без натягу);
- 4) Повне руйнування.

У моделі з композитною арматурою з натягом 23 кН порівняно з моделлю зі сталевую арматурою з натягом 29 кН моменти є меншими:

- 1) Утворення тріщин в розтягнутій зоні – на 18,2 %;
- 2) Утворення тріщин в стиснутій зоні – на 10,7 %;
- 3) Утворення пластичного шарніру – на 12,1 %;
- 4) Руйнування – на 11,4 %.

Отже, зазначені моменти є меншими на 10,7–18,2 %, що корелює з меншим на 20,7 % зусиллям натягу арматурного пакету.

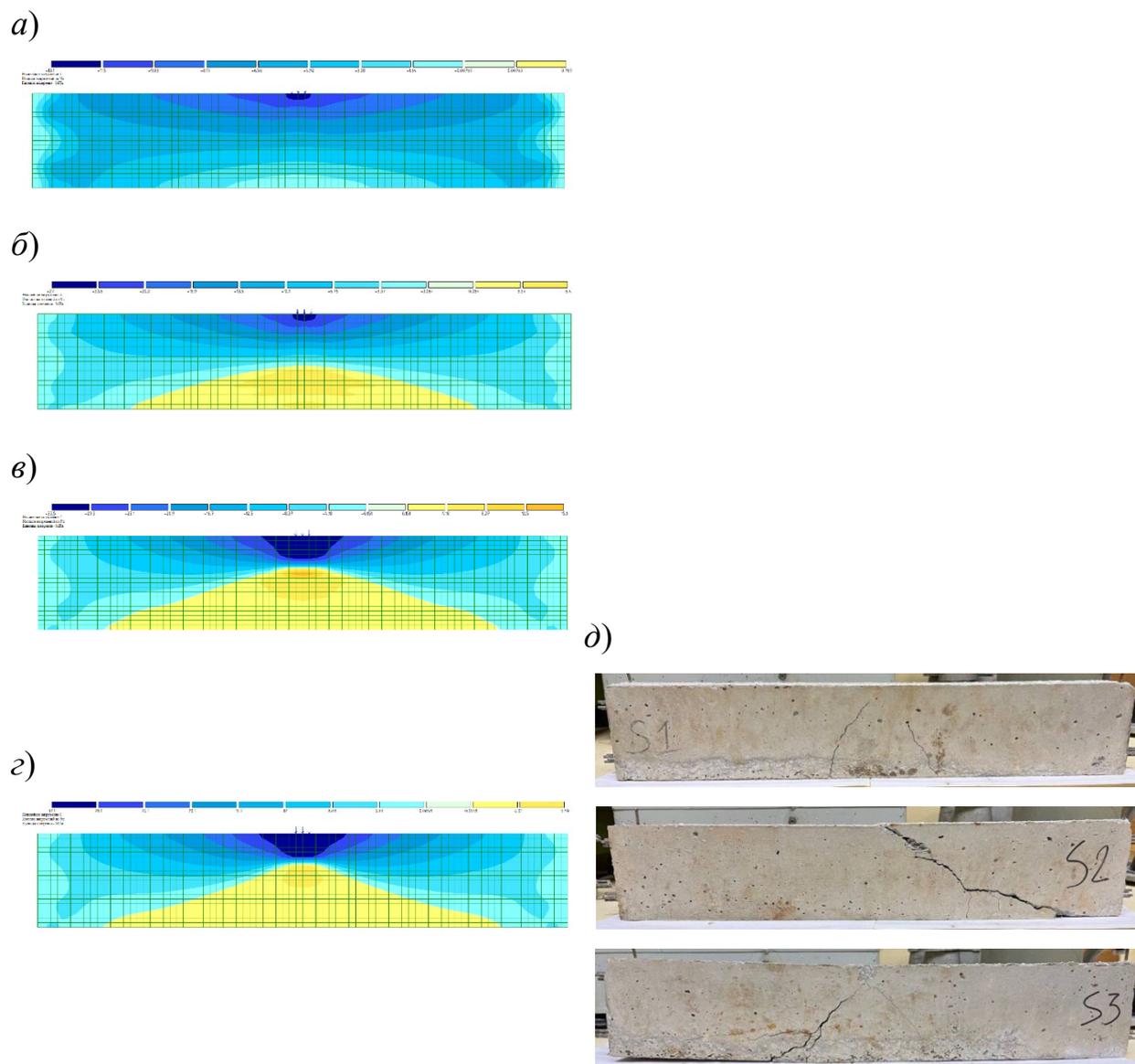


Рис. 4.1 – Результати розрахункового та натурного експериментів з навантаження моделей зі сталевією арматурою із зусиллям попереднього натягу пакету 29 кН: *a* – поля напружень в моделі на момент утворення тріщин в розтягнутій зоні; *б* – те ж саме на момент утворення тріщин в стиснутій зоні; *в* – те ж саме під час утворення пластичного шарніру; *г* – те ж саме на момент руйнування; *д* – вигляд зразків *S1*, *S2*, *S3* моделі після руйнування

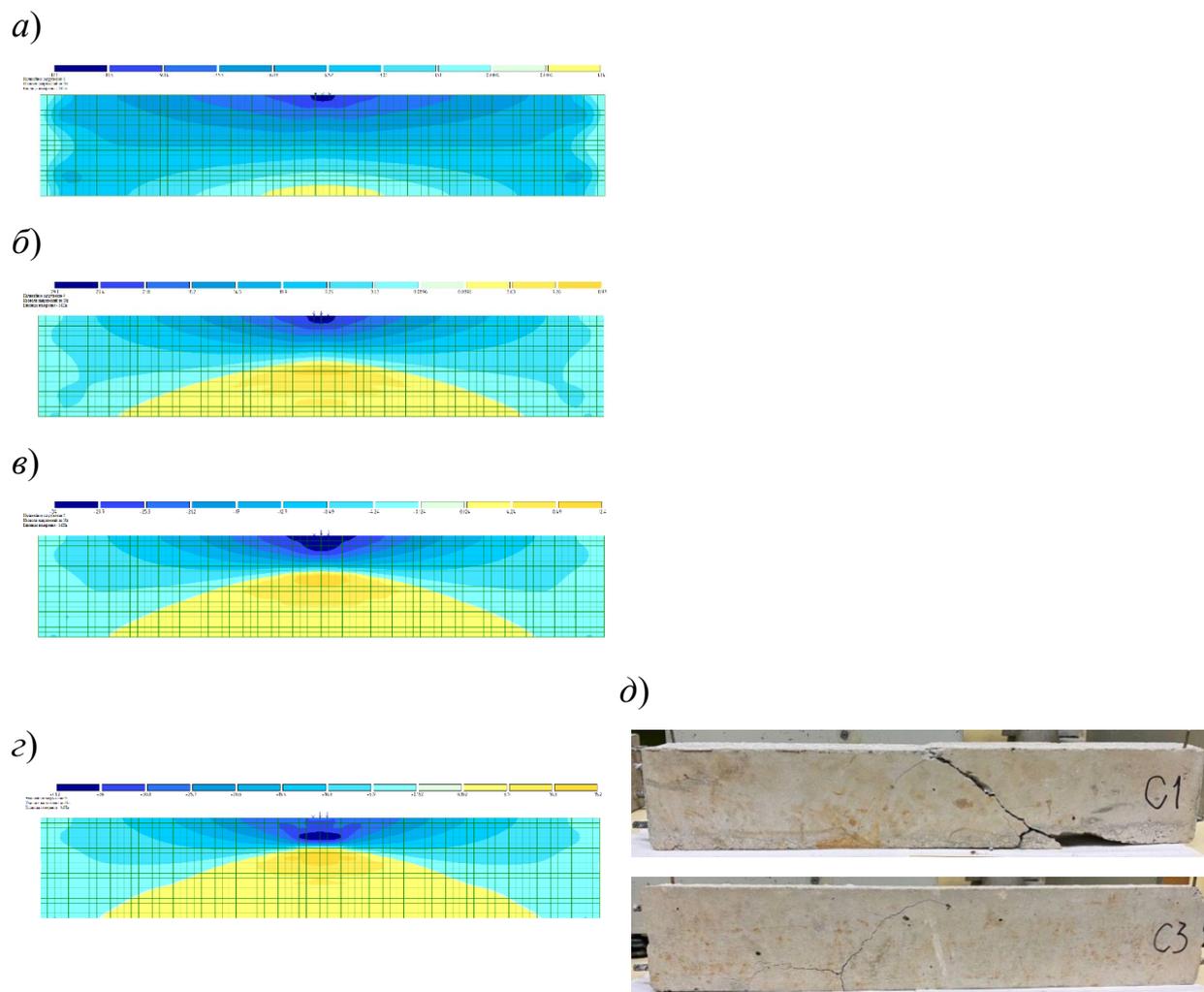


Рис. 4.2 – Результати розрахункового та натурного експериментів з навантаження моделей з композитною арматурою із зусиллям попереднього натягу пакету 23 кН: *a* – поля напружень в моделі під час утворення тріщин в розтягнутій зоні; *б* – те ж саме під час утворення тріщин в стиснутій зоні; *в* – те ж саме під час утворення пластичного шарніру; *г* – те ж саме під час руйнування; *д* – вигляд зразків *C1*, *C2*, *C3* моделі після руйнування

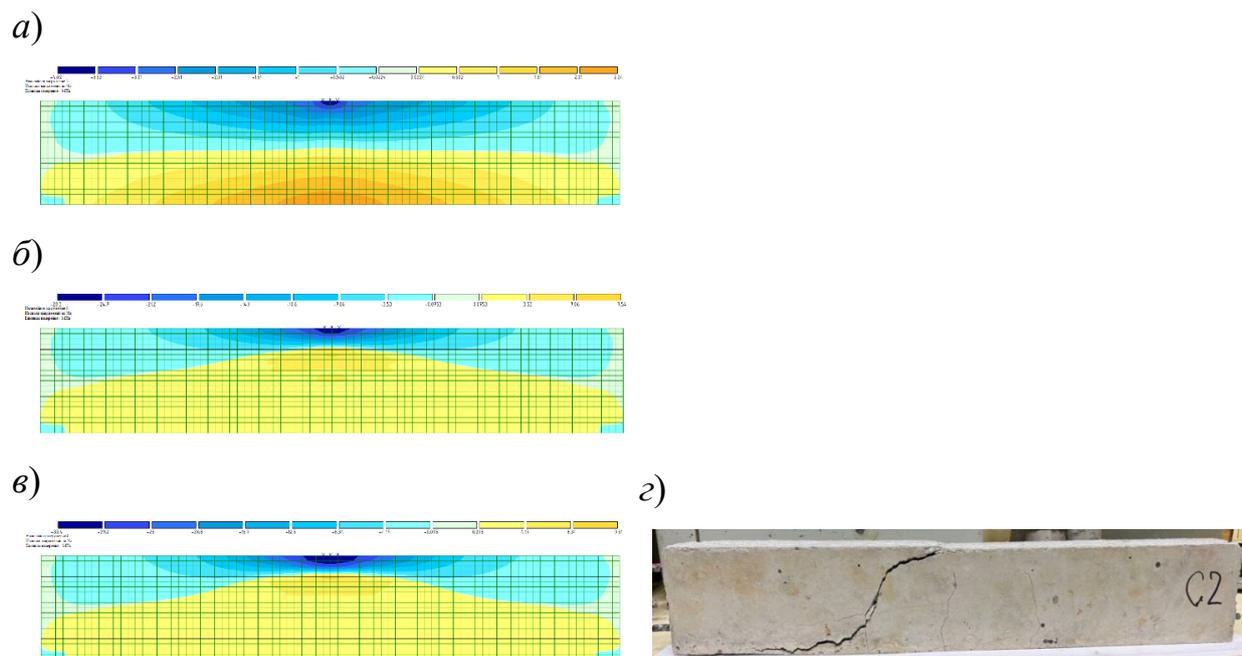


Рис. 4.3 – Результати розрахункового та натурного експериментів з навантаження моделі з композитною арматурою без попереднього натягу: *a* – поля напружень в моделі на момент утворення тріщин в розтягнутій зоні; *б* – те ж саме на момент утворення тріщин в стиснутій зоні; *в* – те ж саме на момент руйнування; *г* – вигляд зразка *C2* моделі після руйнування

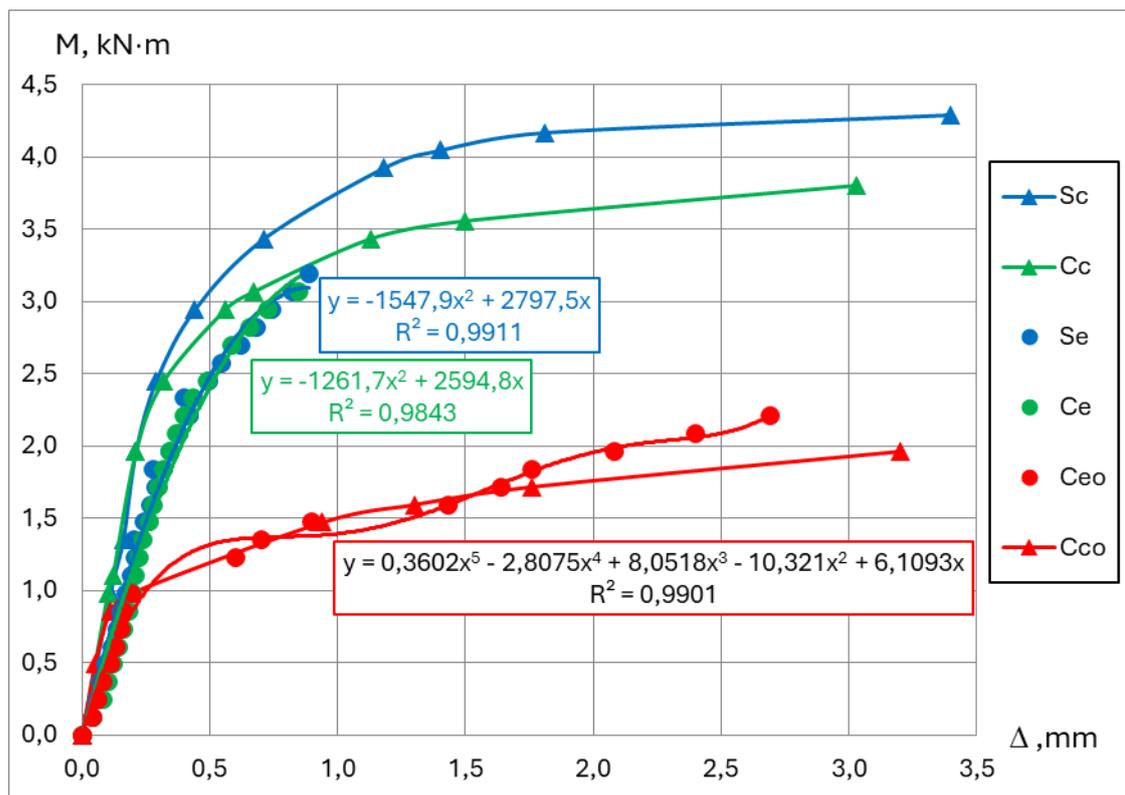


Рис. 4.4 – Розрахункові (з індексами «с») та експериментальні (з індексами «е») залежності стріли прогину Δ від навантаження P (діаграми деформування) моделей: S_c , S_e – зі сталевую арматурою із зусиллям попереднього натягу пакету 29 кН; C_c , C_e – з композитною арматурою із зусиллям попереднього натягу пакету 23 кН; C_{c0} , C_{e0} – з композитною арматурою без натягу

У моделі з композитною арматурою без натягу порівняно з моделлю з композитною арматурою з натягом 23 кН моменти є меншими:

- 1) Утворення тріщин в розтягнутій зоні – на 22,2 %;
- 2) Утворення тріщин в стиснутій зоні – на 48 %;
- 3) Руйнування – на 48,4 %.

Отже, зазначені моменти є меншими на 22,2–48,4 %. У моделі з композитною арматурою без натягу стадія утворення пластичного шарніру не відзначалась.

Таблиця 4.1 – Порівняння результатів розрахункового та натурального експериментів

Стадія руйнування моделі	Показник, за якого досягається стадія руйнування моделі		Од. вимір.	Величина для моделей		
				зі сталевую арматурою з натягом 29 кН	з композитною арматурою з натягом 23 кН	з композитною арматурою без натягу
Утворення тріщин в розтягнутій зоні	Момент	розрахункова величина	кН·м	0,67	0,55	0,43
		фактична величина (експериментальна)	"	1,51	1,32	0,61
	Відхилення розрахункової величини від фактичної		%	-55,4	-58,1	-30,0
	Поправочний коефіцієнт до розрахункової величини		умов. од.	2,24	2,39	1,43
Утворення тріщин в стиснутій зоні	Момент	розрахункова величина	кН·м	1,72	1,53	0,80
		фактична величина (експериментальна)	"	Не відзначалось		
Утворення пластичного шарніру	Момент	розрахункова величина	"	2,02	1,78	Не відзначалось
		фактична величина (експериментальна)	"	близько 2,1	близько 1,8	
Руйнування	Момент	розрахункова величина	"	2,15	1,90	0,98
		фактична величина (експериментальна)	"	1,93	1,85	1,10
	Відхилення розрахункової величини від фактичної		%	11,5	2,5	-11,1
	Поправочний коефіцієнт до розрахункової величини		умов. од.	0,90	0,98	1,13

Як можна бачити з рис. 4.4, модуль пружності композитної арматури у 5,4 рази менший, ніж модуль пружності високоміцного сталевого дроту. Це матиме значний вплив на напружено-деформований стан моделей.

В результаті натурального експерименту встановлено, що характер утворення тріщин в усіх моделях схожий – по мірі навантаження відкривалось по 2–3 перпендикулярні (посередині) та похилі (ближче до країв) тріщини в розтягнутій зоні (рис. 4.1, 4.2, *д*, 4.3, *з*). Утворення видимих тріщин в стиснутій зоні не відзначалось. Характер руйнування – різке збільшення прогину зі значним розкриттям однієї або двох (з двох сторін) крайніх тріщин під кутом близько 45° без руйнування стиснутої зони. Це свідчить про руйнування моделей за рахунок проковзування арматури в бетоні в одній або обох кінцевих ділянках над опорами.

У моделі з композитною арматурою з натягом 23 кН порівняно з моделлю зі сталевую арматурою з натягом 29 кН моменти були меншими:

- 1) Утворення тріщин в розтягнутій зоні – на 12,8 %;
- 2) Руйнування – на 3,7 %.

У моделі з композитною арматурою без натягу порівняно з моделлю з композитною арматурою з натягом 23 кН моменти були меншими:

- 1) Утворення тріщин в розтягнутій зоні – на 53,5 %;
- 2) Руйнування – на 40,5 %.

За результатами розрахункового експерименту можна констатувати, що на всі моменти, що характеризують міцність та тріщиностійкість моделей, вид арматури впливає в набагато меншому ступені, ніж зусилля попереднього натягу арматурного пакету.

Як видно з ізополів напружень, наведених на рис. 4.1–4.3, у моделі з композитною арматурою порівняно з моделлю зі сталевую арматурою на всіх стадіях навантаження розтягнута зона більш широка, а стиснута зона вужча. Це свідчить про її менші жорсткість і тріщиностійкість орієнтовно пропорційно різниці зусиль попереднього натягу їх арматурних пакетів. У моделі з ненапруженою композитною арматурою (рис. 4.3) розтягнута зона

набагато більша, що підтверджує висновки наведеного вище кількісного аналізу.

Якщо прийняти отримані натурним експериментом величини показників жорсткості, міцності та тріщиностійкості фактичними, із табл. 4.1 видно, що розрахункові величини моментів утворення тріщин в розтягнутій зоні є меншими за фактичних величин. У моделях зі сталевую арматурою з натягом 29 кН ці моменти є меншими на 55,4 %, у моделях з композитною арматурою з натягом 23 кН – на 58,1 %, у моделях з композитною арматурою без натягу – на 30 %. Величини руйнівних моментів відрізняються від фактичних величин: моделі зі сталевую арматурою з натягом 29 кН – більша на 11,5 %, моделі з композитною арматурою з натягом 23 кН – більша на 2,5 %, моделі з композитною арматурою без натягу – менша на 11,1 %. Отже, визначені розрахунком моменти утворення тріщин для моделей з попередньо-напруженою сталевую та композитною арматурою суттєво нижчі фактичних величин – на 55,4–58,1 %, для моделі з ненапруженою композитною арматурою – на 30 %. Визначені розрахунком руйнівні моменти мають набагато кращу збіжність з фактичними величинами. Відхилення складають: для моделі зі сталевую арматурою з натягом 29 кН – (+11,5 %), для моделі з композитною арматурою з натягом 23 кН – (+2,5 %), для моделі з композитною арматурою без натягу – (–11,1 %).

Із наведеного вище аналізу рис. 4.4 і табл. 4.1 випливає, що у моделей з композитною арматурою моменти, яким відповідають всі стадії деформування, менші, ніж у моделей зі сталевую арматурою. Величини, на яку вони менші, корелюють з меншими зусиллям натягу і модулем пружності арматури. Це пояснюється меншим модулем пружності композитної арматури. Проте на всі моменти, що характеризують міцність та тріщиностійкість моделей, вид арматури вплинув менше, ніж зусилля попереднього натягу. Це пояснюється меншим зусиллям натягу композитної арматури порівняно зі сталевую, досягнутим під час експерименту. Це в певній мірі є недоліком проведеного дослідження, який може бути усунутий

проведенням нової серії експериментів із забезпеченням однакового зусилля натягу арматури.

На відміну від [80], де результати отримані для балок з ненапруженою арматурою, отримані в цьому дослідженні величини деформацій, поправочних коефіцієнтів, а також зроблені висновки придатні для аналізу напружено-деформованого стану шпал та проектування їх конструкції. Це стало можливим завдяки попередньому напруженню в моделях арматури як в розтягнутій, так і у стисненій зонах, як у шпал. Результати аналізу напружено-деформованого стану, зокрема перевірки виконання вимог до тріщиностійкості шпал, будуть достовірними за умови уведення в розрахунок визначених поправочних коефіцієнтів, наведених в табл. 4.1.

Отримані результати підтверджують можливість конструювання шпал з композитною арматурою потрібної тріщиностійкості розрахунками методом скінчених елементів за [95]. Такі шпали можуть бути впроваджені у масове виробництво і укладання в колію після їх дослідної експлуатації на електрифікованій вантажонапруженій ділянці залізниці у встановленому порядку за умови відсутності їхнього пошкодження більше ніж допускається чинними нормами.

Результати дослідження міцності, жорсткості та тріщиностійкості шпал на моделях викладено у [99–102].

4.2 Дослідження впливу електричних потенціалів на корозійні процеси

4.2.1 Електричний опір моделей

Результати вимірювання електричного опору моделей наведено у додатку Б та узагальнено у табл. 4.2. На рис. 4.5 наведено зміну електричного опору в часі по мірі вимірювання на постійному струмі.

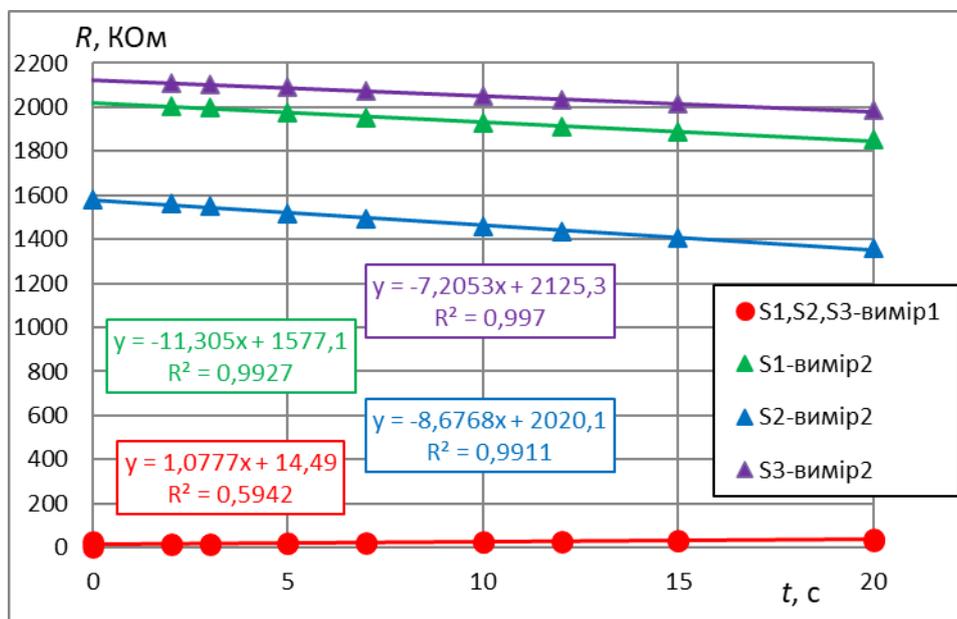
Таблиця 4.2 – Електричний опір моделей зі сталевую та композитною арматурою

Арматура	Модель	Електричний опір моделі R , кОм, виміряний					
		на перемінному струмі		на постійному струмі			
				первинний вимір		вторинний вимір після зміни полярності	
Сталевий дріт	S1	19,5	18,0	27,5	23,9	1940	1828
	S2	17,0		19,9		1484	
	S3	17,5		24,2		2059	
Композитна	C1	127,5	126,5	29,0	385,4	61	510
	C3	126,0		23,9		1380	
	C2*	126,0		1103,4		87	
K_e			7		16		0,3

Як бачимо із табл. 4.2, величини електричного опору, виміряні на перемінному та постійному струмі до зміни полярності є порівняними. В свою чергу із табл. 4.2 і рис. 4.5 видно, що вимірювання електричного опору на постійному струмі зі зміною полярності дає значення електричного опору, яке збільшується після цієї зміни в моделях зі сталевую арматурою – у 76 раз, в моделях з композитною арматурою – у 1,3 рази. Це свідчить про суттєву

поляризацію моделі зі сталевую арматурою за рахунок першого вимірювання і несуттєву – для моделі з композитною арматурою.

а)



б)

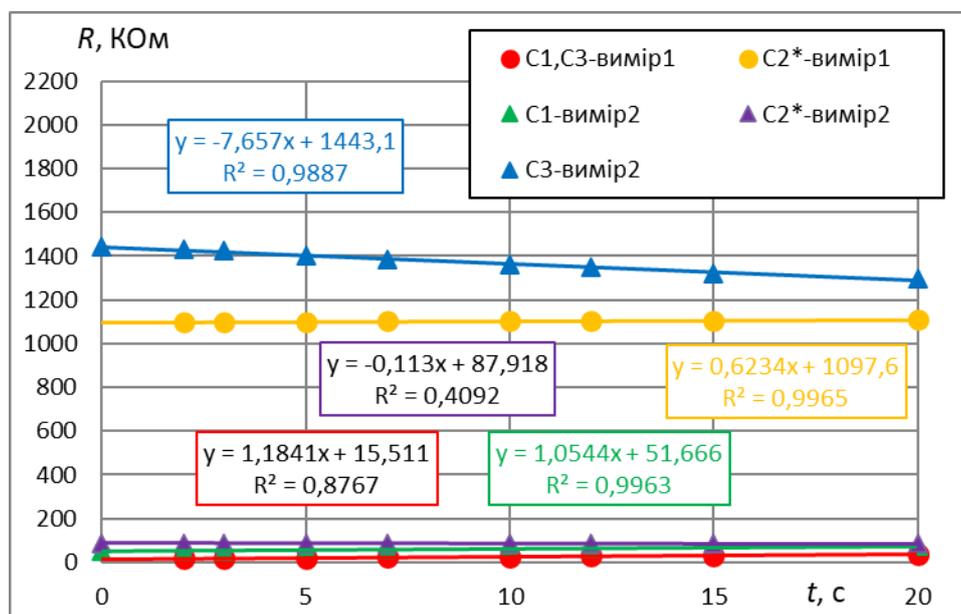


Рис. 4.5 – Зміна електричного опору в часі по мірі вимірювання на постійному струмі: а – моделей S1, S2, S3 з напруженою сталевією арматурою; б – моделей C1, C3 з напруженою та C2* з ненапруженою сталевією арматурою; вимір 1 – первинний; вимір 2 – повторний після зміни полярності вимірювання

Аналіз результатів вимірювань показав, що електричний опір моделей шпал збільшується за рахунок заміни сталеві дотяної арматури композитною у 7 раз за вимірювання на перемінному струмі та у 16 раз за вимірювання на постійному струмі. Отже, експериментально встановлено, що електричний опір моделей шпал збільшується за рахунок заміни сталеві дотяної арматури композитною у 7–16 раз. Це кореспондується з визначеним розрахунком у п. 3.3.2 збільшенням електричного опору шпал між крайніми анкерами у суху та вологу погоду за рахунок заміни сталеві дотяної арматури композитною у 6–11 раз.

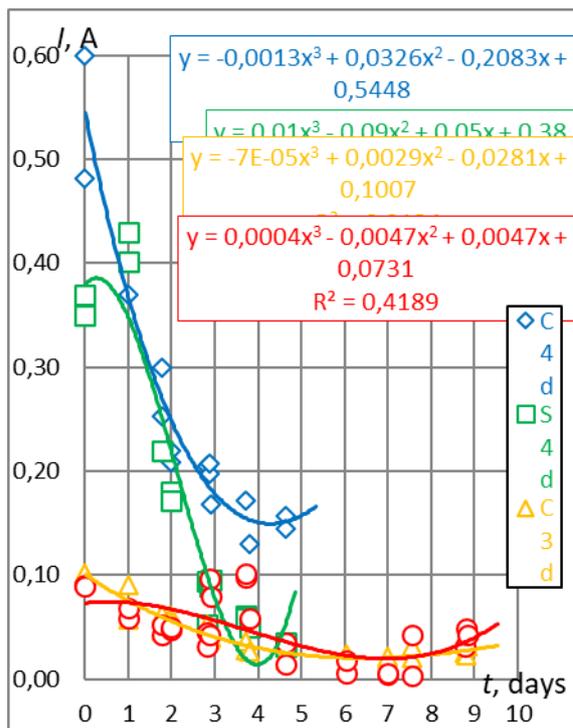
Встановлене розрахунком збільшення електричного опору шпал у дощову погоду за рахунок заміни сталеві дотяної арматури композитною на декілька порядків підтверджується зазначеною вище збіжністю результатів, отриманих розрахунком та експериментально.

4.2.2 Зміна сили струму в моделях та їхнього електричного опору протягом експозиції

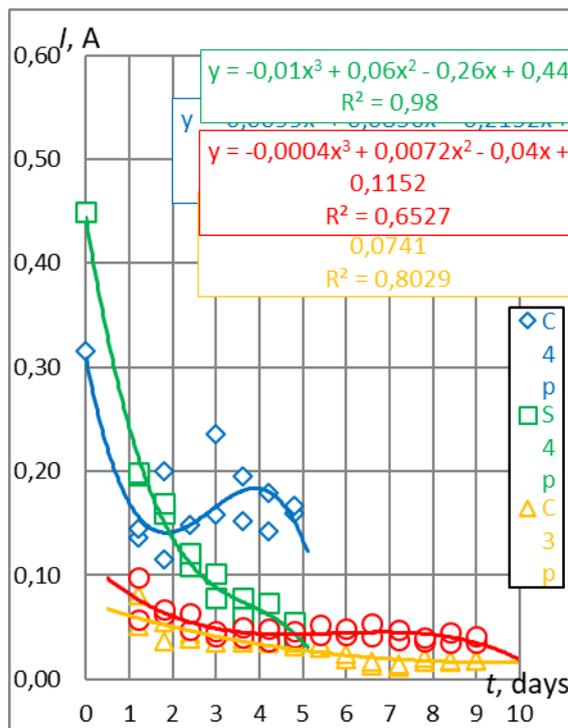
Результати вимірювань сили струму крізь моделі та їхнього електричного опору впродовж експозиції наведено на рис. 4.6 і узагальнено в табл. 4.3.

Під час експозиції розчин *NaOH* зверху моделей S4d, C4d, S4p, C4p інтенсивно забарвлювався продуктами корозії електродів в коричневий колір і ставав непрозорим (рис. 4.7). Електроди протягом експозиції розчинялись і один раз були замінені. Вода зверху моделей S3d, C3d, S3p, C3p також забарвлювалась, але набагато менш інтенсивно, не стаючи непрозорими, електроди розчинялись, але також менш інтенсивно, і не замінювались.

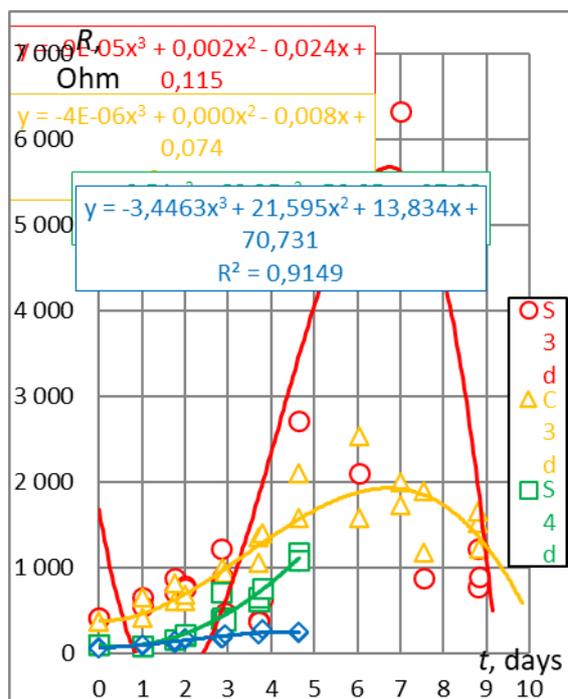
а



б



в



г

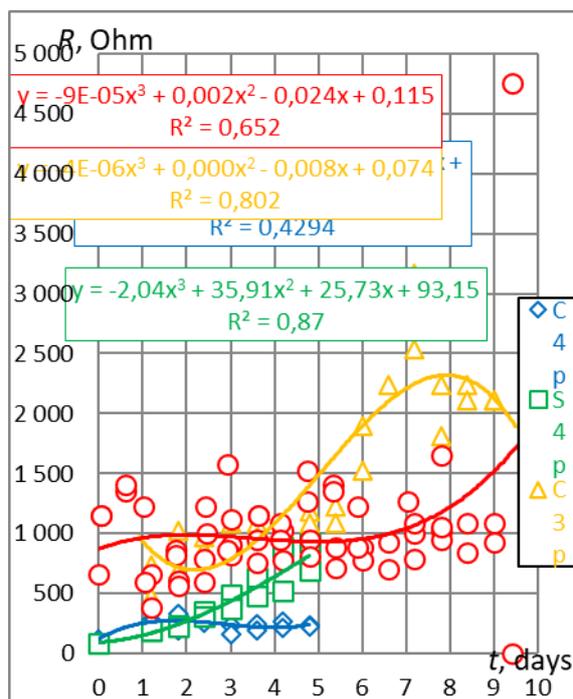


Рис. 4.6 – Зміна в часі впродовж впливу постійного та пульсуючого (в перерахунку на тривалість безпосереднього електричного впливу) електричного потенціалу: а – сили струму у зразках S3d, C3d, S4d, C4d; б – те ж саме у зразках S3p, C3p, S4p, C4p; в – електричного опору зразків S3d, C3d, S4d, C4d; г – те ж саме зразків S3p, C3p, S4p, C4p

Таблиця 4.3 – Показники корозійного ураження моделей після експозиції

Середовище	Назва показника	Показники корозійного ураження зразків з арматурою					
		сталевою дротяною			КОМПОЗИТНОЮ		
		після експозиції зі впливом					
		тільки середовища (без електричного)	постійного потенціалу	ПОЕП	тільки середовища (без електричного)	постійного потенціалу	ПОЕП
у воді	Зразок	S1	S3d	S3p	C1	C3d	C3p
	Сила струму під час експозиції						
	- на початку I_0 , А		0,090	0,057		0,101	0,072
	- в кінці I_i , А		0,042	0,008		0,031	0,011
	$(I_0-I_i)/I_0$, %		58,3	86,0		69,3	84,7
	Вилуговування (нейтралізація)	немає	немає	немає	немає	немає	немає
	Корозія арматури:						
	- кінців	немає	значне руйнув.	немає	немає	немає	немає
	- всередині	немає	немає	немає	немає	немає	немає
у розчині NaCl	Зразок	S2	S4d	S4p	C2	C4d	C4p
	Сила струму під час експозиції						
	- на початку I_0 , А		0,350	0,126		0,481	0,333
	- в кінці I_i , А		0,035	0,074		0,145	0,216
	$(I_0-I_i)/I_0$, %		90,0	41,3		69,9	35,1
	Вилуговування (нейтралізація)	немає	немає	немає	немає	немає	немає
	Глибина проникнення хлоридів						
	- мм	21,6	40	40	16,2	40	40
	- %	54,1	100	100	40,4	100	100
	Корозія арматури:						
	- кінців	слабка поверх.	повне розчин.	повне розчин.	немає	немає	немає
	- всередині	немає	так	так	немає	немає	немає

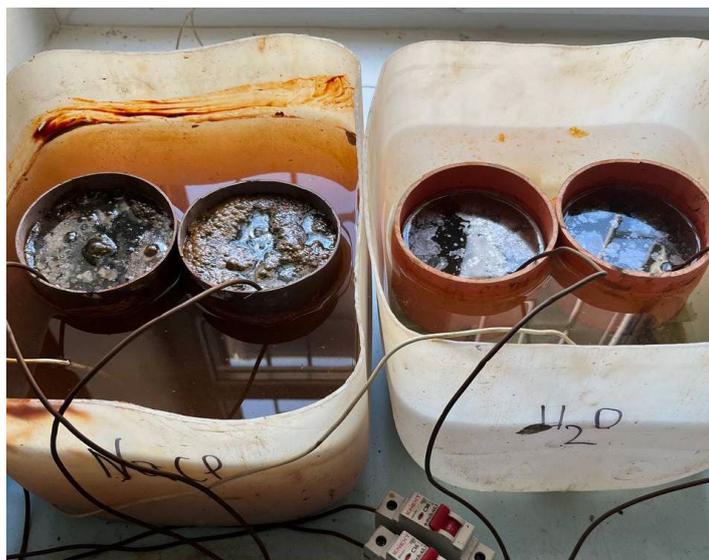


Рис. 4.7 – Зразки С4р, S4р та С3р, S4р (зліва – направо)
після 8 діб експозиції під впливом ПОЕП

4.2.3 Оцінка нейтралізації цементного каменю в моделях

Після експозиції зрізи всіх зразків забарвлювались розчином фенолфталеїну в малиновий колір (рис. 4.8), отже нейтралізація цементного каменю і цементно-піщаного розчину від будь-якого електричного впливу встановленої для дослідження тривалості на помітну глибину від поверхні не спостерігалась.



Рис. 4.8 – Поверхня зрізів моделей С3р після експозиції під агресивними та електричними впливами, оброблена розчином фенолфталеїну (таке ж саме забарвлення на всю товщину спостерігалось на зрізах всіх зразків)

4.2.4 Оцінка проникнення хлоридів у моделі

Результати визначення глибини проникнення хлоридів вибірково наведено на рис. 4.9 та узагальнено в табл. 4.3. Із рис. 4.9, *а* видно, що за рахунок тільки дифузії без електричного впливу у зразках S2 глибина проникнення хлоридів складає 14,8–27,7 мм (рис. 4.9, *а*), в середньому 21,6 мм, у зразках C2 – 13,1–19,5 мм (рис. 4.9, *б*), в середньому 16,2 мм. У зразках S4d, C4d, S4p, C4p за рахунок електроміграційного перенесення глибина проникнення хлоридів сягнула 40 мм, отже на всю товщину зразка (рис. 4.9, *в*).

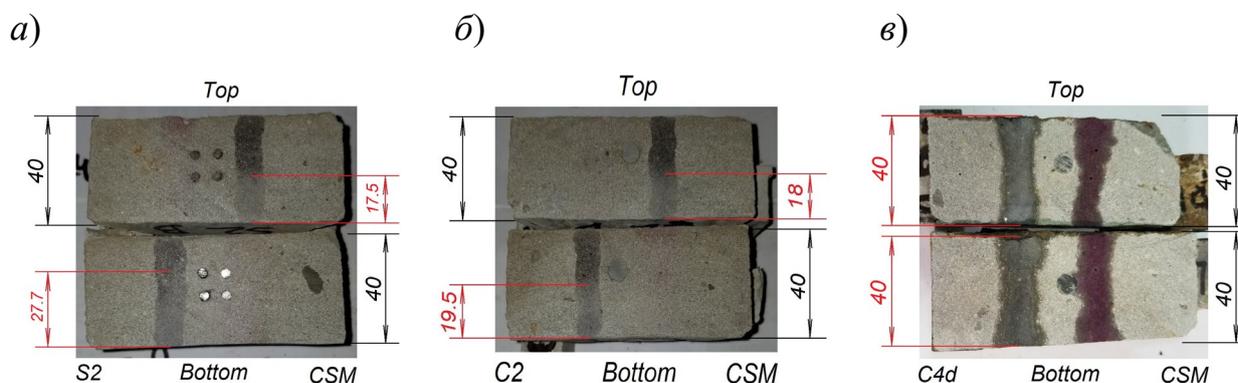


Рис. 4.9 – Визначення за допомогою розчину нітрату срібла глибини проникнення хлоридів внаслідок експозиції в розчині $NaCl$: *а* – без електричного впливу у зразку S2 зі сталеву дрютяною арматурою; *б* – те ж саме C2 з композитною арматурою (*б*); *в* – з впливом постійного електричного потенціалу у зразку C4d з композитною арматурою (у зразку S4d зі сталеву дрютяною арматурою також спостерігалось проникнення на всю товщину зразка)

4.2.5 Оцінка корозійного ураження арматури

Зовнішній вигляд розрізаних після експозиції зразків наведено на рис. 4.10. Випуски сталеву дрютяною арматури зразку S1 слідів корозії майже не мали (рис. 4.10, *а*), зразку S2 зазнали незначної поверхневої корозії (рис. 4.10,

в), зразку S3d зазнали суттєвого корозійного руйнування (рис. 4.10, б), зразку S4d зазнали повного корозійного розчинення (рис. 4.10, г).

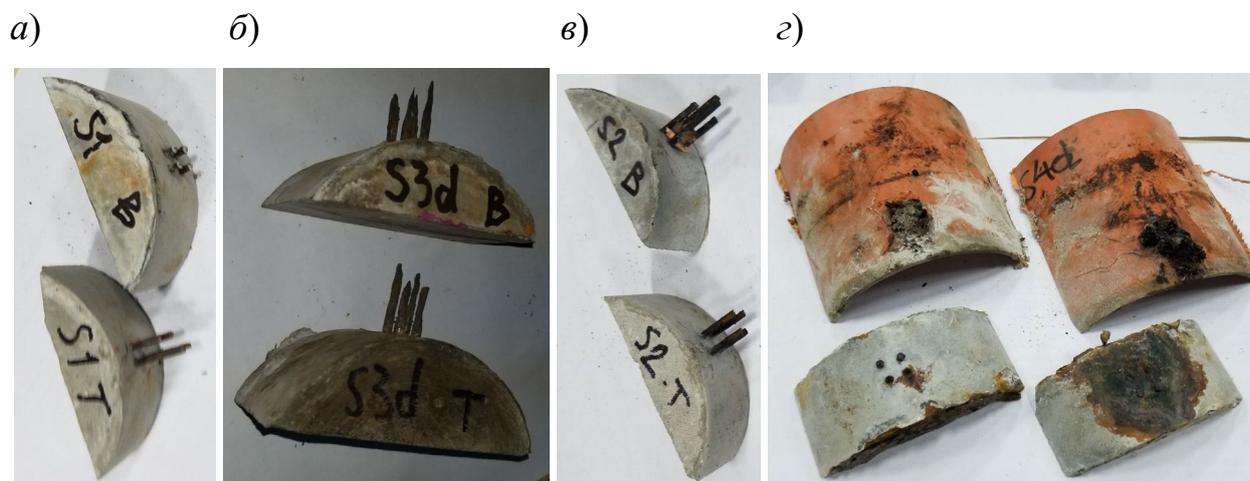
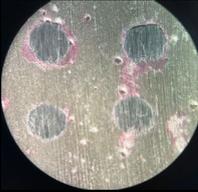
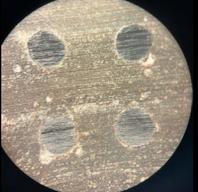
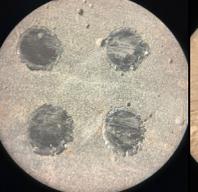
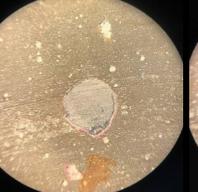
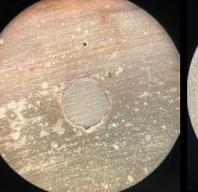
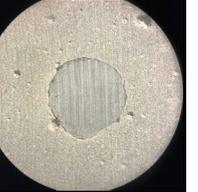
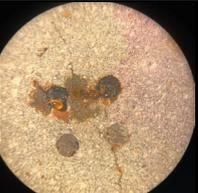
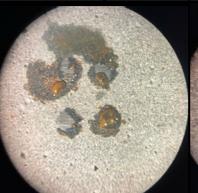
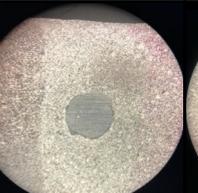
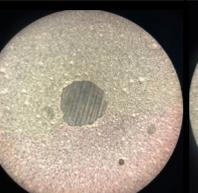
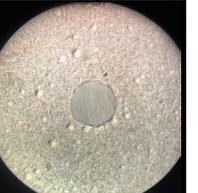
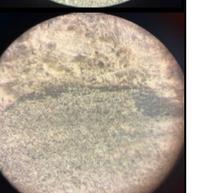


Рис. 4.10 – Стан випусків сталевोї дротяної арматури із зразків після експозиції: а – у воді без електричного впливу S1 без слідів корозії; б – те ж саме з впливом постійного потенціалу S3d з суттєвим корозійним руйнуванням; в – у розчині $NaCl$ без електричного впливу S2 з незначною поверхневою корозією; г – те ж саме з впливом постійного потенціалу з повним корозійним розчиненням

Мікроснімки зрізів зі збільшенням 7,5 і 82,5 наведені на рисунках у табл. 4.4. Корозія сталевोї дротяної арматури всередині зразків S1, S2, S3d не спостерігалась, у зрізах зразків S4d, S4p неозброєним оком спостерігались ознаки корозії – винесені продукти корозії у вигляді коричневого ареолу, а у зразка S4d – ще й радіальні мікротріщини.

Таблиця 4.4 – Мікрознімки зрізів зразків зі сталевую дотяною та композитною арматурою після експозиції

		Мікрознімки зрізів зразків з арматурою					
		сталевую дотяною			КОМПОЗИТНОЮ		
Середовище		після експозиції зі впливом					
		тільки середовища (без електричного впливу)	постійного потенціалу	ПОЕП	тільки середовища (без електричного впливу)	постійного потенціалу	ПОЕП
Вода – вода	S1	S3d	S3p	C1	C3d	C3p	
							
Розчин NaCl – розчин NaOH	S2	S4d	S4p	C2	C4d	C4p	
							
							

4.2.6 Оцінка корозійного ураження арматури та бетону методом наноіндентування

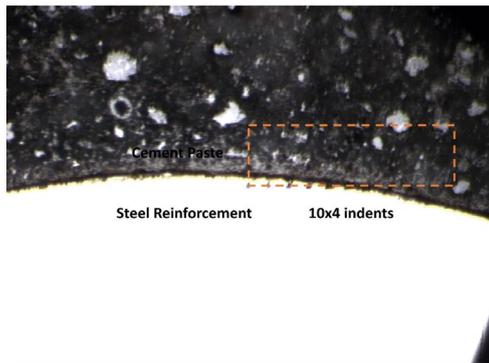
Результати досліджень зразків із моделей, які зазнали електричних впливів, методом наноіндентування наведено на рис. 4.11, 4.12 та узагальнено у табл. 4.5 і на рис. 4.13. Зокрема, на рис. 4.11, 4.12 представлені зображення оптичної мікроскопії деяких досліджених зон разом з відповідними ним картами мікромеханічних властивостей – модуля пружності M та мікротвердості H , у табл. 4.5 – граничні та середні величини мікромеханічних властивостей структурних елементів всіх зразків. На рис. 4.13 наведено отримані залежності модуля пружності M та мікротвердості H цементного каменю від відстані h від нижньої грані зразка, до якої прикладався негативний полюс постійного потенціалу та ПОЕП.

Таблиця 4.5 – Мікромеханічні властивості структурних елементів зразків

Структурний елемент		Модуль пружності					Мікротвердість				
		M , ГПа			S ,	V ,	H , МПа			S ,	V ,
		min	max	сер	ГПа	%	min	max	сер	МПа	%
Цемент- ний камінь	Зернисті продукти гідратації	3,9	94,5	21,5	9,7	49,9	0	11,4	1,02	1,0	98,4
	Гомогенні продукти гідратації	3,8	8,9	5,1	1,0	18,9	0,20	0,49	0,29	0,1	21,9
	Негідратовані частинки клінкеру			101					8,06		
Сталевий дріт		198	241	216	5,3	2,4	5,00	7,19	6,08	0,3	5,6
Композитна арматура	Епоксидний полімер	4,1	7,6	5,5	0,7	12,6	0,22	0,46	0,35	0,1	17,7
	Базальтова фібра	33,4	60,7	45,1	5,8	12,9	3,36	6,29	5,00	0,7	13,9

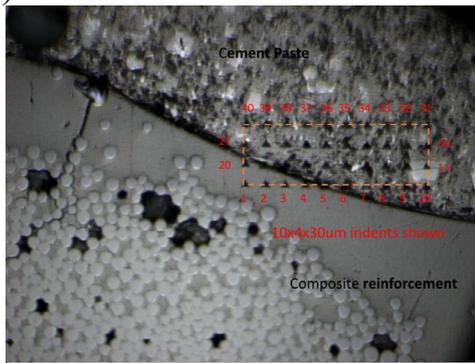
Примітка: S – середньоквадратичне відхилення; V – коефіцієнт варіації

a)



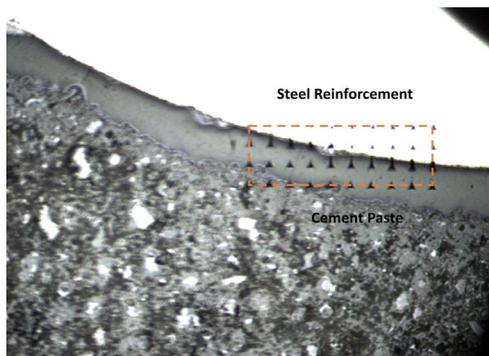
M, GPa	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270
90	25.9	32.4	20.8	18.7	22.8	35	39.1	71.2	44.9	48.1
60	16.4	20.5	15.9	21.9	26.3	20.5	22.1	29.5	27.5	29.8
30	37.5	29	31	26.5	94.5	32.4	15.2	38.3	28.8	29.6
0	215.7	216.8	213.4	194.4	177	58.4	32.8	4.7	23	30.2
H, MPa	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270
90	0.7	0.68	0.38	0.44	0.54	0.79	0.98	3.72	0.78	1.38
60	0.34	0.42	0.43	0.48	0.52	0.45	0.45	0.55	0.69	0.79
30	1.79	1.3	0.9	0.51	11.44	1.08	0.37	0.57	0.9	0.91
0	5.72	5.91	5	5.37	3.58	1.18	0.65	0.24	0.95	1.05

б)



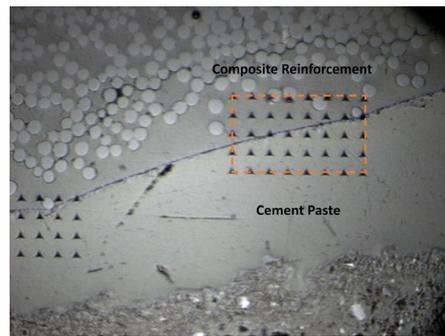
M, GPa	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270
90	29.5	29.5	25.7	24.2	26.9	14.6	29	26.3	23.3	26.1
60	50.8	36.7	20.9	36.6	29.5	22.7	38.8	32.1	49.2	31.2
30	5.2	9.4	18.6	28.9	23	25.3	26.9	44	37.5	100.8
0	5.3	5	5.3	5.5	14.2	27	5.8	22.7	35.4	24.9
H, MPa	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270
90	0.91	1.19	0.99	0.78	0.83	0.39	1.17	1.08	0.82	0.75
60	5.13	1.53	0.68	1.19	0.94	0.93	1.46	1.69	2.39	1.11
30	0.35	0.73	0.73	1.32	0.9	0.92	1	1.93	1.56	8.06
0	0.35	0.32	0.37	0.37	0.66	1.21	0.39	0.88	1.42	0.69

в)



M, GPa	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270
90	197.6	215.1	214.2	223.5	224.5	225.5	216	217.4	222.8	225.5
60	4.5	5.7	59.2	137.7	89.5	209.3	218.9	222.6	214.4	225.8
30	3.9	4.5	4.4	4.3	5.3	4.2	5.2	6.2	18.2	120.8
0	23.7	25.6	10.4	5.5	8.5	4.4	4.3	3.9	3.8	3.9
H, MPa	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270
90	5.49	6.01	6.04	6.26	6.4	6.61	5.6	5.94	6.13	6.46
60	0.26	0.35	1.35	3.94	2.49	5.61	5.94	6.12	5.93	6.05
30	0.2	0.26	0.25	0.25	0.33	0.22	0.31	0.36	0.58	3.04
0	1.11	2.36	0.49	0.31	0.43	0.25	0.25	0.21	0.2	0.2

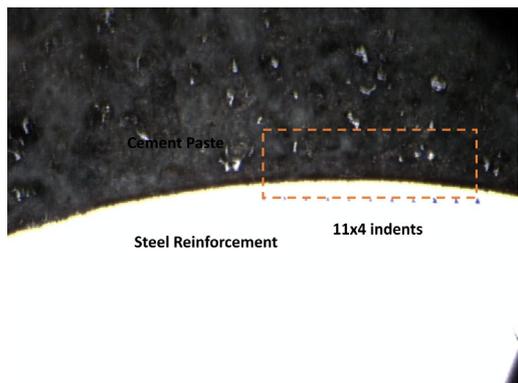
г)



M, GPa	0	30	60	90	120	150	180	210
120	5.1	5.2	49.4	45.8	5.9	35	5.5	5.7
90	5.6	5.3	5.3	5.4	4.5	4.9	4.4	4.9
60	5.2	5.5	4.7	4.4	4.2	4.2	4.2	4.3
30	4.3	4.5	4.2	4.3	4.3	4.3	4.2	4.2
0	4.4	4.1	4.4	4.2	4.2	4.2	4.3	4.3
H, MPa	0	30	60	90	120	150	180	210
120	0.34	0.35	6.26	5.81	0.42	3.36	0.4	0.38
90	0.4	0.38	0.38	0.38	0.27	0.31	0.25	0.24
60	0.34	0.39	0.23	0.25	0.24	0.24	0.24	0.25
30	0.25	0.27	0.24	0.25	0.25	0.25	0.25	0.24
0	0.27	0.24	0.26	0.24	0.25	0.24	0.25	0.25

Рис. 4.11 – Поверхні зрізів зразків і карти механічних властивостей після впливу постійного потенціалу у водному середовищі: а – МПЗ над сталевую дрютяною арматурою; б – те ж саме композитною арматурою; в – МПЗ під сталевую дрютяною арматурою; г – те ж саме композитною арматурою

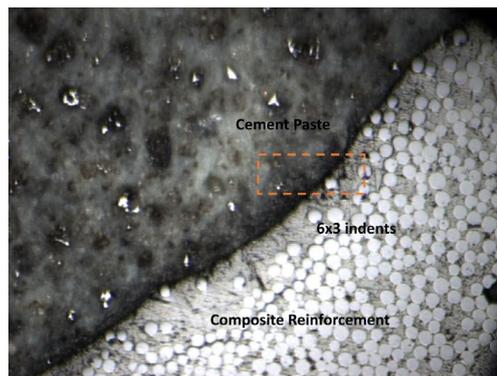
a)



M, GPa	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300
90	29	48.5	39.4	27.2	16.5	22.2	39.8	38.1	20	27	23
60	17.7	21.9	39.5	26.9	27.8	72.5	53	45	43.9	29.7	53.1
30	164.1	210.5	139.5	177.5	176.7	170.7	108.9	62.1	122.5	160.1	69
0	207.9	215	215	223	219.5	217.7	220	215.2	217.5	213.8	217.3

H, MPa	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300
90	1.19	2.54	1.44	1.25	0.53	0.72	1.21	1.59	0.55	0.94	1.11
60	0.51	0.52	1.33	0.93	0.97	5.87	4	1.57	1.48	1.17	3.95
30	3.12	3.84	2.43	2.86	2.95	3.38	1.48	1	2.17	2.17	0.44
0	5.91	6.04	6.1	6.54	6.58	6.41	6.45	6.18	6.21	6.02	5.96

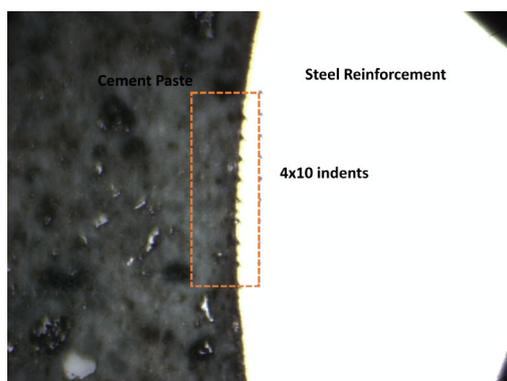
б)



M, GPa	0	30	60	90	120	150
60	12	18.5	19.2	15.7	5.5	14
30	12.8	10.5	9.6	48.8	4.9	40.6
0	28.6	47.3	7.9	6.2	5.5	18.2

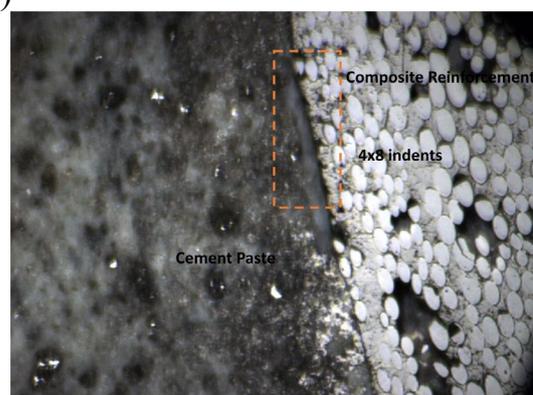
H, MPa	0	30	60	90	120	150
60	0.36	0.43	1.02	1.2	0.33	0.58
30	0.37	0.36	0.23	6.11	0.27	4.35
0	0.89	3.24	0.38	0.45	0.37	0.75

в)



H, MPa	0	30	60	90	M, GPa	0	30	60	90
270	0.22	2.02	4.48	5.75	270	11.1	38.6	160	206.2
240	0.28	0.86	4.57	6.57	240	9.2	16.4	161.9	221.2
210	0.2	0.63	3.42	5.7	210	8.3	19.9	140.4	215.9
180	0.73	0.88	3.59	6.28	180	20.3	23.6	136.8	218.9
150	0.53	1.97	3.78	5.96	150	17.6	37.8	148.1	213.6
120	0.24	0.83	4.53	6.25	120	10.2	29.2	174.3	216.2
90	0.56	4.25	4.26	7.19	90	21.3	28.9	171.2	241.3
60	0.5	1.67	4.05	6.41	60	15.6	35	166.6	217.1
30	0.21	1.73	2.69	6.3	30	8.5	34.6	136	218.8
0	1.28	1.34	2.8	6.24	0	38.9	14	137.7	222.4

г)



M, GPa	0	30	60	90	H, MPa	0	30	60	90
210	6.8	4.5	33.5	33.4	210	0.33	0.22	3.42	3.7
180	7.1	45.5	43.4	14.7	180	0.23	4.77	3.36	0.95
150	8	5.6	7	6.8	150	0.28	0.36	0.4	0.33
120	5.2	5.6	6.5	40.4	120	0.15	0.22	0.46	4.84
90	3.9	5.6	5.2	20.8	90	0.13	0.27	0.33	2.31
60	8.8	6.9	4.1	56.1	60	0.37	0.22	0.25	5.5
30	3.9	6.4	5.6	7.7	30	0.12	0.25	0.42	0.48
0	13.1	8.9	3.4	8.1	0	0.57	0.52	0.27	0.47

Рис. 4.12 – Поверхні зрізів зразків і карти механічних властивостей після впливу ПОЕП у водному середовищі: а – МПЗ над сталеву дрютяною арматурою; б – те ж саме композитною арматурою; в – МПЗ ліворуч від сталеву дрютяною арматури; г – те ж саме композитну арматури

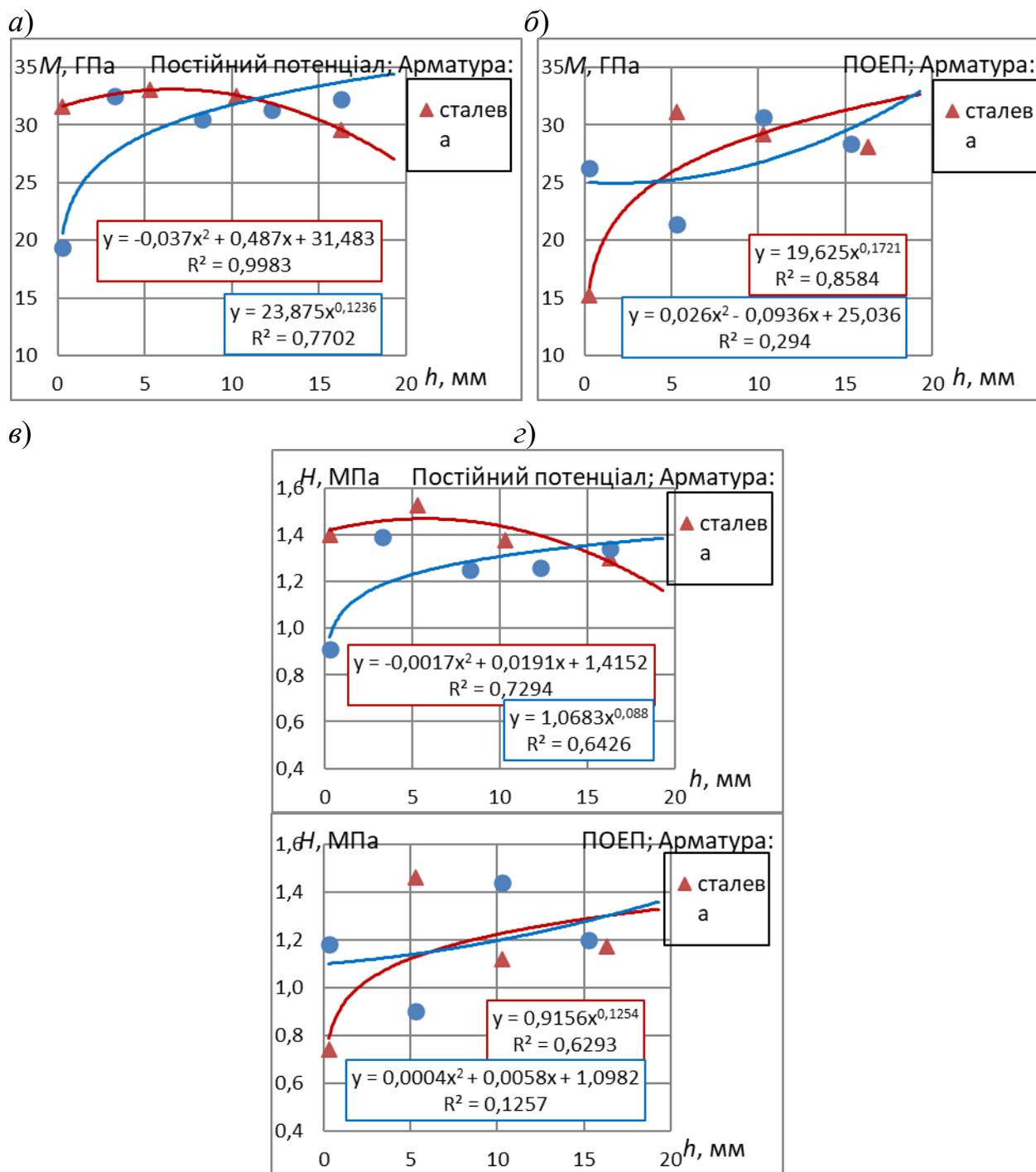


Рис. 4.13 – Залежність від відстані h від нижньої грані (негативного потенціалу): *а* – модуля пружності M цементного каменю після впливу постійного потенціалу; *б* – те ж саме після впливу ПОЕП; *в* – мікротвердості цементного каменю H після впливу постійного потенціалу; *г* – те ж саме ПОЕП

4.2.7 Електронно-мікроскопічні дослідження наслідків електричного впливу на моделі

Результати електронно-мікроскопічних досліджень цементного каменю зразків зі сталеву дотяною та композитною арматурою, які зазнали електричних впливів постійного потенціалу та ПОВП, наведені на рис. 4.14. Під електронно-мікроскопічними знімками наведено залежності відношення вмісту кальцію до вмісту кремнію Ca/Si від відстані від нижньої грані зразка, до якої прикладався негативний полюс потенціалу.

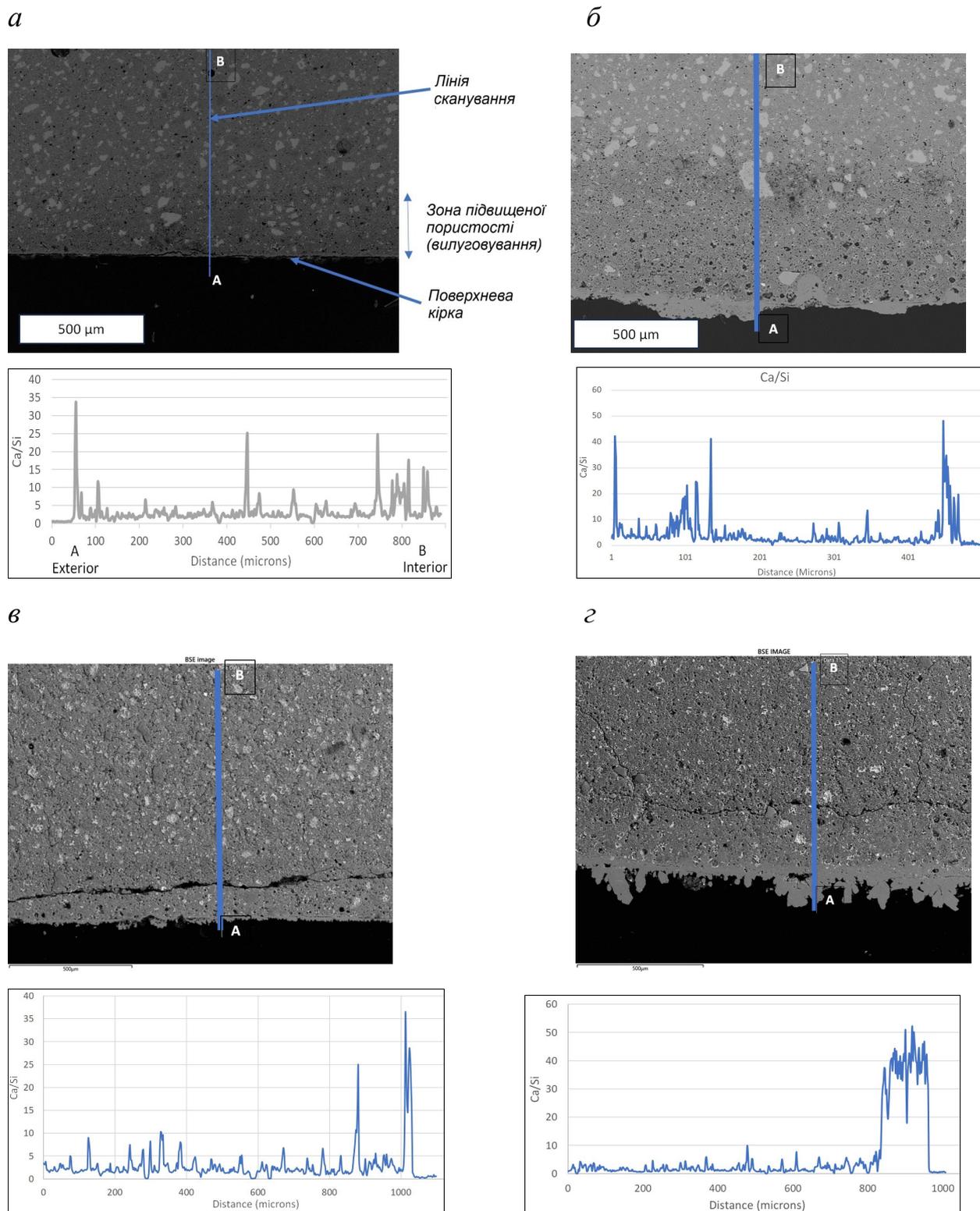


Рис. 4.14 – Електронно-мікроскопічні знімки та розподіл відношення Ca/Si по висоті зразка: *a* – S3d зі сталеву арматурою, що зазнав впливу постійного електричного потенціалу; *б* – S3d з композитною арматурою, що зазнав впливу постійного потенціалу; *в* – S3r зі сталеву арматурою, що зазнав впливу ПОЕП; *г* – S3r з композитною арматурою, що зазнав впливу ПОЕП

4.2.8 Загальна оцінка наслідків агресивних, у т.ч. електричних впливів на моделі

Із рис. 4.6 і табл. 4.3 видно, що сила струму протягом обох видів електричних впливів для всіх зразків зменшувалась, електричний опір зразків зростав, Внаслідок впливу постійного потенціалу сила струму зменшилась на 58–69 %, ПОЕП – на 85–86 %. Це може бути обумовлене поляризацією колоїдних частинок продуктів гідратації цементу, збільшенням електричного опору внаслідок колюматації порового простору неелектропровідними продуктами корозії на кшталт з відомим явищем адаптації бетону – набуттям здатності опиратись агресивним впливам під цими впливами [103]. Також це може свідчити про вилуговування, яке призводить до зменшення концентрації іонів Ca^{2+} в поровому електроліті цементного каменю. Проте із рис. 7 видно, що лужне середовище після експозиції зберігається по всій висоті зразка, отже, вилуговування на збільшення електричного опору зразка в цілому не впливає.

Із рис. 4.9 і табл. 4.3 видно, що внаслідок тільки дифузії глибина проникнення хлоридів не перевищує 16–21 мм (40–54 % товщини зразка), тоді як під впливом як постійного потенціалу, так і ПОЕП, проникнення внаслідок електроміграційного перенесення відбулось на всю товщину зразків 40 мм.

Із рис. 4.10, б і табл. 4.3 видно, що сталева дротяна арматура зазнає корозії у порядку зростання інтенсивності: без електричного впливу в середовищі, що містить хлориди – у разі впливу постійного потенціалу у водному середовищі – у разі впливу як постійного потенціалу, так і ПОЕП у середовищі, що містить хлориди. Композитна арматура не зазнала ушкоджень у будь-яких з цих умов.

Із рис. 4.11, 4.12 видно, що у зразках розрізняються основні структурні елементи (табл. 4.5) – цементний камінь та арматура. На зображеннях у цементному камені розрізняються дисперсні та гомогенні продукти гідратації

цементу. Для цих структурних елементів розраховано середні значення M і H , їх середньоквадратичні відхилення S та коефіцієнти варіації V . Дисперсні продукти гідратації за мікромеханічними властивостями дуже неоднорідні – їх модуль пружності M коливається від 3,9 до 94,5 ГПа, середнє значення – 21,5 ГПа, коефіцієнт варіації 49,9 %. Гомогенні продукти гідратації спостерігаються на границі розподілу з арматурою і утворились, очевидно, в місцях утворення карманів води замішування під арматурою під час виготовлення моделей. Їх модуль пружності M незначний, коливається від 3,8 до 8,9 ГПа, середнє значення – 5,1 ГПа, коефіцієнт варіації 18,9 %. У зерна клінкера, яке проглядалось очевидно, M склав 101 МПа. Сталевий дріт є однорідним, з модулем пружності M від 198 до 241, в середньому 216 ГПа, коефіцієнтом варіації 2,4 %. Композитна арматура складається із базальтових волокон з модулем пружності M від 33,4 до 60,7, в середньому 45,1 ГПа, коефіцієнтом варіації 12,9 % і епоксидної смоли з M від 4,1 до 4,6, в середньому 5,5 ГПа, коефіцієнтом варіації 12,6 %.

Отже, навколо обох типів армування є різноманітні міжфазні області з різними механічними властивостями. Наприклад, відносно слабкі та широкі МПЗ навколо сталеві арматури спостерігаються на рис. 4.11, *в*, навколо композитної – на рис. 4.11 *б*, *г*. Тоді як відносно міцні та вузькі МПЗ навколо сталеві арматури відмічаються на рис. 4.11, *а*, 4.12, *а*, *в*, навколо композитної – на рис. 4.12, *б*, *г*. Як і очікувалося, МПЗ на верхній частині арматури виявилися міцнішими порівняно з тими, що знаходяться під арматурою. Головним чином це відбувається через те, що зайва вода замішування затримується під арматурою, що робить ділянку більш пористою. Саме ці ділянки МПЗ найбільш уразливі для корозійних процесів (мікрофотознімки зразків S4d, S4p в табл. 4.4).

Навколо композитної арматури спостерігаються ділянки з товстим шаром полімеру (рис. 4.11, *г*, 4.12, *г*). Таке полімерне покриття може впливати на властивості МПЗ та погіршувати зчеплення цементного каменю з арматурою.

На рис. 4.13 наведено розподіл мікромеханічних властивостей цементного каменю (дисперсних продуктів гідратації) по висоті зразка – залежності M і H від відстані від його нижньої грані, яка була з боку негативного потенціалу. Як видно із рис. 4.13, більшість з них добре або задовільно апроксимується (з коефіцієнтами кореляції R від 0,55 до 1,0, одиничний випадок 0,35) поліномами 2 ступеня або ступеневими рівняннями. Видно також, що розподіл мікромеханічних властивостей цементного каменю по висоті зразка для моделей зі сталеву дрютяною і композитною арматурою, які зазнавали впливу постійного потенціалу (S3d, C3d) та ПООП (S3р, C3р) суттєво відрізняється. Для зразків C3d і S3р шар над нижньою гранню товщиною близько 0,3 мм має значно нижчі значення M та H порівняно з іншими тестовими смужками на кілька мм вище. Отже, впливи постійного та пульсуючого електричних потенціалів на зазначений шар цементного каменю моделі зі сталеву та композитною арматурою різні:

1) під впливом постійного потенціалу в зразку зі сталеву арматурою S3d зміна мікромеханічних властивостей по його висоті задовільно описується поліномами другого ступеня і є несуттєвою – M і H по всій висоті зразка складають близько 32 ГПа і 1,4 МПа, відповідно;

2) під впливом постійного потенціалу в зразку з композитною арматурою C4d M по висоті зразка збільшується від 20 до 34 ГПа, а H – від 1 до 1,4 МПа, зміна добре описується ступеневими рівняннями з коефіцієнтами кореляції 0,85 і 0,91;

3) під впливом ПООП в зразку зі сталеву арматурою S3р M по висоті зразка збільшується від 15 до 32 ГПа, а H – від 0,8 до 1,3 МПа, зміна добре описується ступеневими рівняннями з коефіцієнтом кореляції 0,79 і 0,93;

4) під впливом пульсуючого однонаправленого потенціалу в зразку з композитною арматурою C3р зміна мікромеханічних властивостей задовільно описується поліномами другого ступеня і є несуттєвою – M і H по всій висоті зразка складають близько 26 ГПа і 1,2 МПа, відповідно.

Як видно із графіків рис. 4.13, електричні впливи призвели до утворення градієнтів мікромеханічних властивостей цементної пасти, обумовлених, винесенням катіонів Ca^{2+} і розкладанням $Ca(OH)_2$ та гідросилікатів кальцію. В глибині моделей, де вилуговування не спричинило відчутних наслідків, модуль пружності M складає 27–33 ГПа, а мікротвердість H – 1,2–1,4 МПа. Поблизу нижньої грані, де винесена максимальна кількість іонів Ca^{2+} , M і H знижуються до 15–20 ГПа та 0,8–1 МПа, відповідно.

Отже під впливом постійного потенціалу у моделі зі сталеною арматурою електрокорозійні процеси в цементному камені майже не відбуваються, очевидно, через стікання струму через випуски арматури (рис. 1). У моделі з композитною арматурою, у якій стікання струму через арматуру не відбувається та він весь протікає через цементний камінь, навпаки, електрокорозійні процеси в цементному камені протікають.

Під впливом ПООП у зразку зі сталеною арматурою, незважаючи на стікання струму з випусків арматури, електрокорозійні процеси в цементному камені протікають інтенсивно, очевидно, через процеси поляризації і депольоризації арматури і шару цементного каменю між арматурою і нижньою гранню. У моделі з композитною арматурою, навпаки, електрокорозійні процеси в цементному камені майже не спостерігаються, можливо, через відсутність участі арматури в поляризації та вдвічі більшу товщину шару цементного каменю, який поляризується.

Скануюча електронна мікроскопія показала, що нижній шар цементного каменю всіх зразків товщиною до 1 мм значно більш пористий, ніж інші частини вище. Це є чіткими ознаками вилуговування, хоча й помірною, судячи зі збереження лужної реакції фенолфталеїну, але прогресуючого. Для зразків S3d і C3r різниця в значеннях M і H на різній висоті від низу істотно не відрізнялася. Скануючою електронною мікроскопією виявлено кальцит в нижній частині зразків. Вважається, що кальцит утворюється внаслідок карбонізації кальцію, який вимивається з внутрішньої частини цементного тіста. Оскільки значення M і H кристалів кальциту значно вищі, ніж у фаз

гідратованого цементного тіста, вони могли внести свій внесок у результати M і H нижнього шару.

Результати досліджень впливу електричних потенціалів на корозійні процеси викладено у [104–107].

Висновки за розділом 4

1. Розроблено та виготовлено фізичні моделі шпал із бетону з композитною та сталевую арматурою, побудовано їх скінчено-елементні моделі. Виконано розрахунковий і натурний експерименти з їх навантаження. Встановлено, що по мірі навантаження всіх моделей та збільшення моменту від нього деформування розвивається до руйнування стадіями. Це такі стадії: утворення тріщин в розтягнутій зоні; їх розвиток до утворення пластичного шарніру; повне руйнування за рахунок проковзування арматури в бетоні. У моделі з попередньо-напруженою композитною арматурою порівняно з моделлю зі сталевую арматурою моменти від навантаження, які відповідають зазначеним стадіям, були меншими на 11–18 %. Це корелює з меншим на 21 % зусиллям натягу арматурного пакету з урахуванням меншого модуля пружності композитної арматури. У моделі з композитною арматурою без натягу порівняно з моделлю зі сталевую арматурою зазначені моменти були меншими на 22–48 %. Отже, на всі моменти, що характеризують міцність та тріщиностійкість моделей, вид арматури вплинув у меншому ступені, ніж зусилля попереднього натягу арматурного пакету.

2. Експериментально встановлено, що електричний опір моделей шпал збільшується за рахунок заміни сталеві дротяної арматури композитною у 7–16 раз, що кореспондується з визначеним розрахунком збільшенням електричного опору шпал між крайніми анкерами у суху та вологу погоду за рахунок заміни сталеві дротяної арматури композитною у 6–11 раз.

3. Експериментально встановлено, що сила струму протягом обох видів електричних впливів для всіх зразків зменшувалась, електричний опір –

зростав. Це пояснене поляризацією колоїдних частинок продуктів гідратації цементу та збільшенням електричного опору внаслідок кольматації порового простору неелектропровідними продуктами корозії.

4. Електричні впливи протягом передбаченого методикою строку експозиції повну нейтралізацію цементного каменю по більшості глибини не спричинили.

5. Встановлено, що внаслідок тільки дифузії протягом передбаченої експозиції глибина проникнення хлоридів не перевищує 16–21 мм, тоді як під впливом як постійного потенціалу, так і ПОЕП проникнення внаслідок електроміграційного перенесення відбулось на всю товщину зразків.

6. Сталева дротяна арматура зазнала корозії у порядку зростання інтенсивності: без електричного впливу в середовищі, що містить хлориди – у разі впливу постійного потенціалу у водному середовищі – у разі впливу як постійного потенціалу, так і ПОЕП у середовищі, що містить хлориди. Композитна арматура не зазнала ушкоджень у будь-яких з цих умов.

7. Методом наноіндентування встановлено, що під впливом постійного потенціалу у зразку зі сталеву арматурою електрокорозійні процеси в цементному камені майже не відбуваються через стікання струму через випуски арматури. У моделі з композитною арматурою, у якій стікання струму через арматуру не відбувається та він весь протікає через цементний камінь, навпаки, електрокорозійні процеси в цементному камені протікають.

8. Під впливом ПОЕП у зразку зі сталеву арматурою, незважаючи на стікання струму з випусків арматури, електрокорозійні процеси в цементному камені протікають інтенсивно через процеси поляризації і деполіризації арматури і шару цементного каменю між арматурою і нижньою гранню. У зразку з композитною арматурою, навпаки, електрокорозійні процеси в цементному камені майже не спостерігаються через відсутність участі арматури в поляризації та вдвічі більшу товщину шару цементного каменю, який поляризується.

РОЗДІЛ 5

ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

5.1 Розроблення способу виготовлення шпал із бетону з композитною арматурою

Стандартні попередньо напружені залізобетонні шпали, армовані сталевим високоміцним дротом (рис. 5.1) [12, 13] формують у металевих формах у перегорнутому положенні.

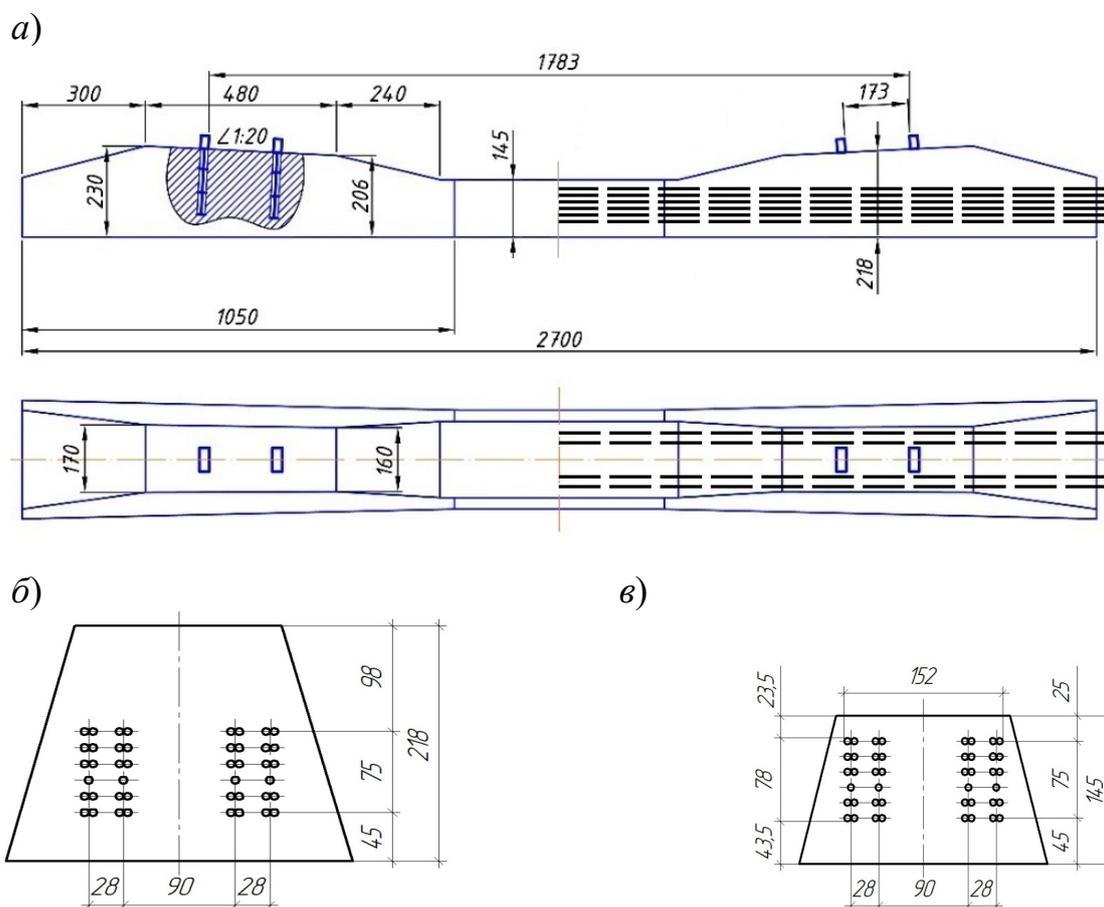


Рис. 5.1 – Конструкція стандартної залізобетонної шпали за [12, 13]

Під час виготовлення шпал пакет дроту розміщують у металевій формі з випуском кінців через торцеві стінки форми, пакет натягують за допомогою гідравлічних домкратів в подовжньому напрямку, натяг пакету передають на форму за допомогою упорних гвинтів, заповнюють форму бетонною

сумішшю та ущільнюють її вібрацією, після твердіння бетону передають натяг арматури з форми на бетон шляхом відпускання упорних гвинтів та обрізання кінців арматури та видаляють готові шпали з форми.

На залізницях України укладають переважно, а на ділянках високих категорій виключно, такі шпали, виготовлені зазначеним способом (рис. 5.2).



Рис. 5.2 – Шпали, укладені на залізницях України

Проте наявність у шпалах сталеві арматури обумовлює їх підвищену електропровідність, що на електрифікованих ділянках залізниць у разі зносу деталей ізоляції рейок 1 (рис. 5.3) від шпал 2 – підрейкових прокладок 3 та рейок 1 від пружних клем 4 та закладних анкерів 5 – ізолюючих вкладишів 6 призводить до порушення роботи електричних рейкових кіл систем централізації та блокування, до втрат тягового струму у вигляді струмів витоку, а постійні струми витоку спричиняють електрокорозію конструкцій колії та споруд [108].

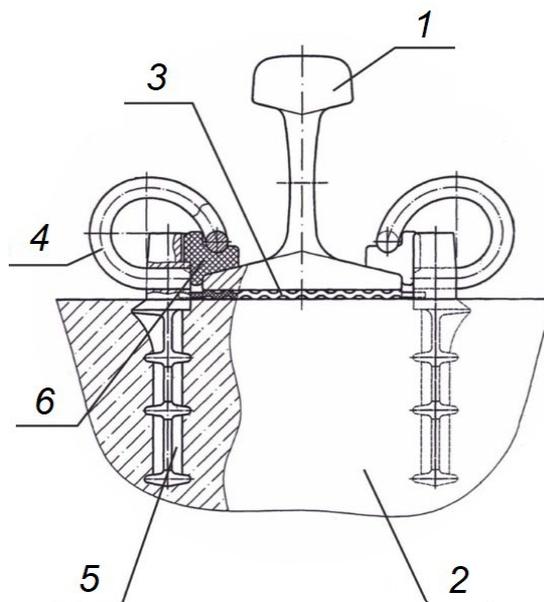


Рис. 5.3 – Анкерне рейкове скріплення

Крім того, навантаження від колісних пар рухомого складу у кривих ділянках колії створює бічний тиск на анкери (рис. 5.3, 5.4), які у свою чергу створюють згинальний момент та, відповідно, значні розтягувальні напруження у зоні анкерів. Ці напруження згідно з полями напружень, отриманими в результаті розрахунків методом скінчених елементів [39], можуть досягати 7 МПа, що перевищує міцність бетону на розтяг та спричиняє утворення тріщин в зоні анкерів (рис. 5.5, а, б).

Запобігти утворенню цих тріщин може армування, проте навіть верхній ряд арматури віддалений від найбільш напруженої зони (рис. 5.1, а, б), а поперечна арматура взагалі не передбачена. Розташування арматури у вигляді пакету подовжньо розташованих паралельних дротин без поперечної арматури (рис. 5.1, а) обумовлює також недостатню стійкість шпал до утворення подовжніх тріщин та відколів на кінцях шпал (рис. 5.6, б, г), в підрейкових площадках (фіг. 5.6, б) та середині (фіг. 5.6, в) шпал, особливо у разі несвоєчасного підбивання шпал під час утримання залізничної колії [39].

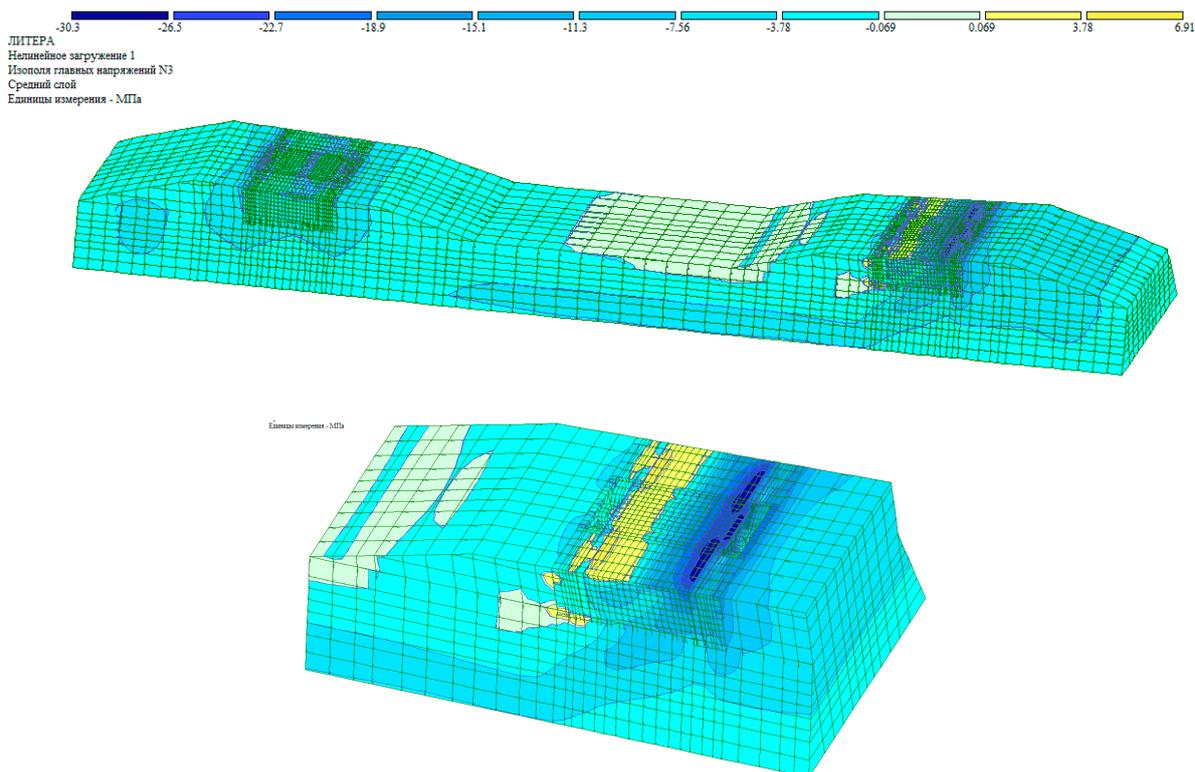


Рис. 5.4 – Поля напружень в залізобетонній шпалі

Виконано аналіз різних технологічних способів виробництва залізобетонних шпал. У [109] запропоновано спосіб виготовлення залізобетонних шпал з анкерами, замуrowаними на нахилених в різні боки підрейкових площадках, що включає установлення анкерів в форму та їх закріплення, натягування в формі арматури, заповнення форми бетонною сумішшю та її ущільнення, теплову обробку суміші та відділення шпали від форми. Перед закріпленням анкера в формі в зазор між стінкою анкера, що повернута в шпалі до її центру, і формою засовують до контакту з ними клиноподібну вставку, у якій кут нахилу площин, що контактують з анкером і формою, більше кута нахилу підрейкової площадки до опорної площини шпали на $2-12^\circ$, а видаляють вставку одночасно з відділенням шпали від форми. Вставку закріплюють в формі одночасно з анкером введенням штиря в отвори, виконані в них. При цьому можуть використовувати вставку, яка має пружність в напрямку поздовжньої осі шпали, що перевищує пружність

вставки, виготовленої зі сталі, а також вставку, яка містить гумову прокладку.

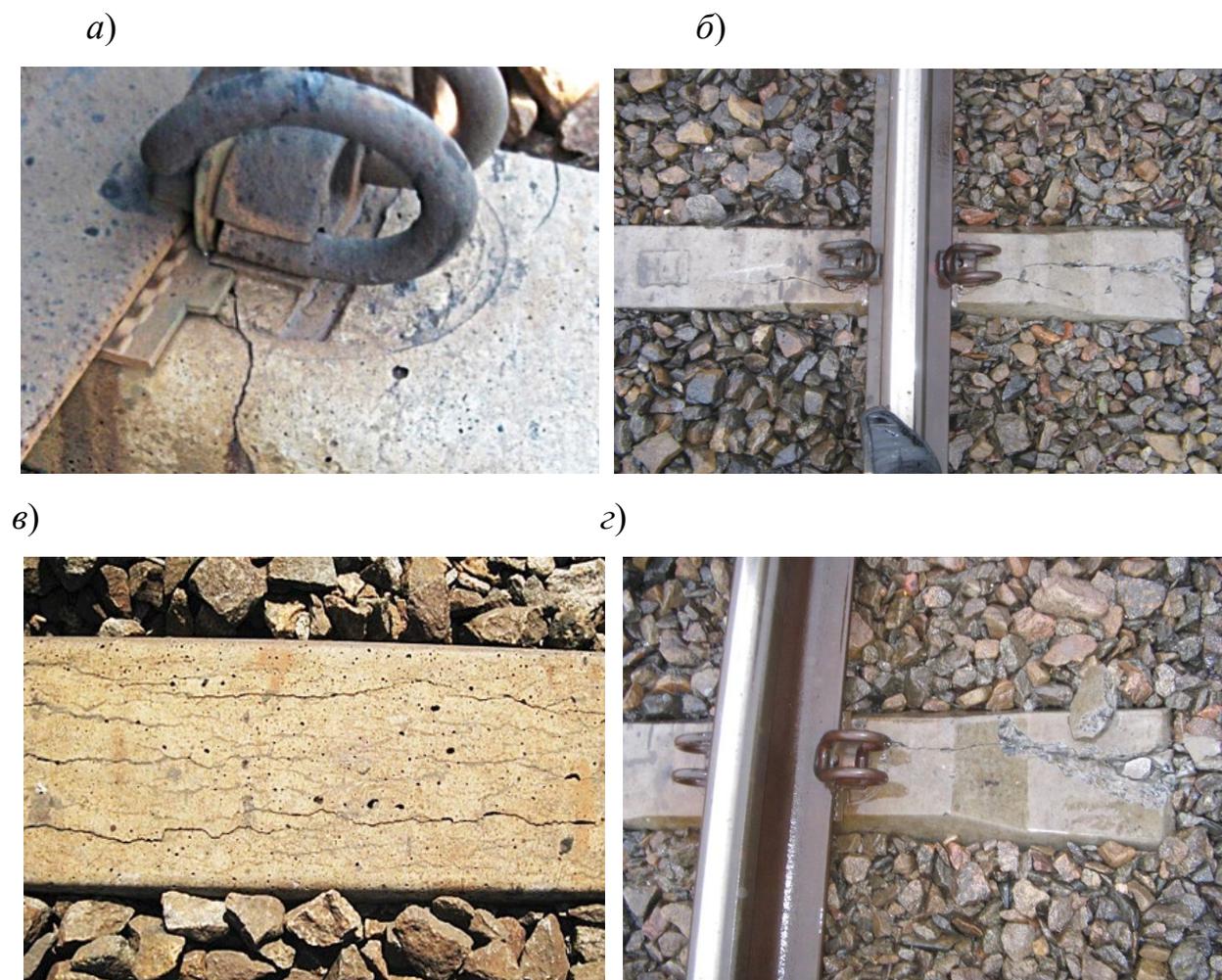


Рис. 5.5 – Пошкодження залізобетонних шпал: *a* – поперечні тріщини в зоні анкерів; *б* – подовжні тріщини на кінцях шпал і в підрейкових площадках (в зоні анкерів); *в* – подовжні тріщини в середині шпал; *г* – відколи на кінцях шпал

Недоліком є наявність сталеві арматури, що знижує електричний опір і створює передумови для електрокорозії. Цей спосіб передбачає подовжнє натягування та обумовлює паралельне розташування арматури та віддаленість її крайнього ряду від підрейкової площадки з анкером, а також не передбачає застосування поперечної арматури. Відсутність арматури безпосередньо в найбільш навантаженій зоні під подошвою рейки та біля анкеру призводить до утворення тріщин, обумовлених додатковими

напруженнями в кривих від бічних сил, що впливають на анкер. Відсутність поперечної арматури є однією з причин утворення у шпалах подовжніх тріщин.

Виконано аналіз способу виготовлення анкерних залізобетонних шпал [110], який включає використання металевих форм, попередню підготовку анкерів, установку їх у металеву форму шляхом закріплення головок анкерів у отворах, виконаних в днищі форми, наповнення металевих форм бетоном з подальшим його ущільненням на вібростолах, пропарювання в камері і вибиття шпал з металевих форм на кантувачі, при цьому використовують анкери, в яких головка з'єднана з ніжкою за допомогою жорсткого фланцевого ущільнювача, нижня частина головки, що опирається на фланцевий ущільнювач, виконана у вигляді замкнутої поверхні коробчастої конфігурації, на яку надівають пружний ущільнювач відповідної конфігурації, зовнішні поверхні якого виконані під кутом $\alpha = 2-3^\circ$ до його внутрішньої поверхні для створення натягу між пружним ущільнювачем і стінками отвору в днищі металевої форми, при цьому посадкові отвори в днищі металевої форми виконані відповідними до контуру бічної поверхні пружного ущільнювача, а закріплення анкерів у отворах проводять шляхом запресування до упирання жорсткого фланцевого ущільнювача в днище металевої форми, після чого виконують роботи у відповідності з технологічним процесом. Недоліком є наявність сталевих арматур, що знижує електричний опір і створює передумови для електрокорозії. Цей спосіб передбачає подовжнє натягування та обумовлює паралельне розташування арматури та віддаленість її крайнього ряду від підрейкової площадки з анкером, а також не передбачає застосування поперечної арматури. Відсутність арматури безпосередньо в найбільш навантаженій зоні під подошвою рейки та біля анкеру призводить до утворення тріщин, обумовлених додатковими напруженнями в кривих від бічних сил, що впливають на анкер. Відсутність поперечної арматури є однією з причин утворення у шпалах подовжніх тріщин.

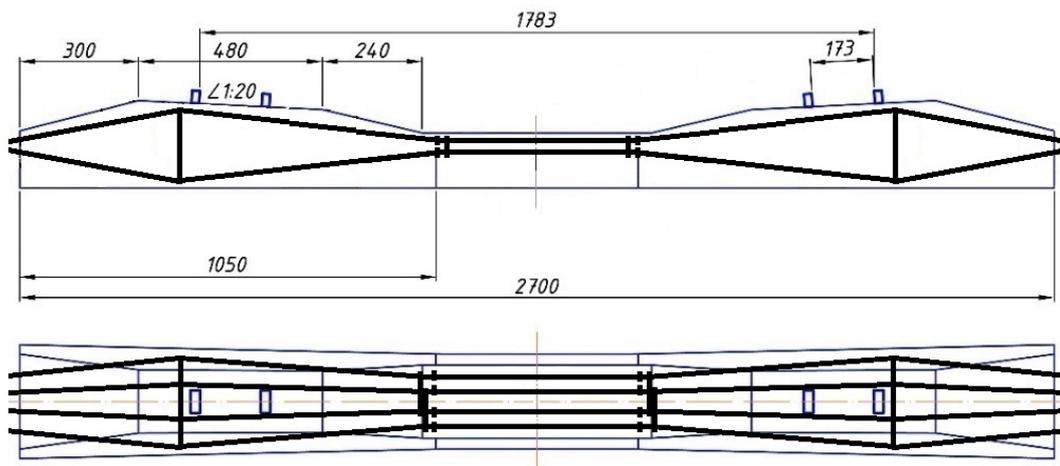
Способи, запропоновані у [109, 110], дозволяють виготовляти якісні залізобетонні шпали, проте ці шпали мають і вказані вище недоліки, зокрема невисокі електричний опір та стійкість до утворення тріщин в зоні анкерів і подовжніх тріщин.

На основі результатів досліджень, викладених у розділах 3, 4, запропоновано замість сталеві дрітної арматури застосувати стержневу композитну, наприклад, базальтопластикову або склопластикову арматуру 7, рис. 5.6, кінці стержнів закріплювати за торцеві стінки форми, в зоні підрейкових площадок шпал влаштовувати хомути – розпірки 8, натягування арматури здійснювати стягуванням в середині шпали в поперечному вертикальному та горизонтальному напрямках з фіксацією взаємного положення стержнів вертикальними 9 та горизонтальними 10 скобами – стяжками.

Заміна сталеві арматури композитною забезпечує підвищення електричного опору шпал. Величину підвищення встановлено експериментальним дослідженням на моделях шпал – балках із бетону 11 (рис. 5.7), армованих сталеві дрітної арматурою 12 та композитною арматурою 13, в яких анкери 3 (рис. 5.3) змодельовані вертикально забетонованими сталевим стержнями 14 (рис. 5.7). Електричний опір моделей зі сталеві дрітної арматурою склав у разі вимірювання на перемінному струмі – 18,0 кОм, на постійному струмі – 23,9 кОм, з композитною арматурою – 127 кОм і 385 кОм, відповідно. Отже, заміна сталеві арматури композитною забезпечила підвищення електричного опору у 7,1–16,1 разів.

Попереднє напруження арматури за допомогою її натягу у поперечному напрямку забезпечило наближення верхнього ряду арматури до підрейкової площадки а, отже, підвищення стійкості до утворення тріщин в зоні анкерів.

a)



б)

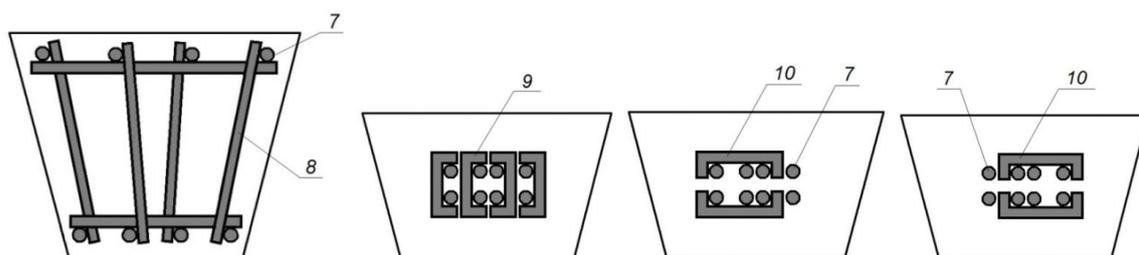


Рис. 5.6 – Розташування стержнів композитної арматури в шпалі

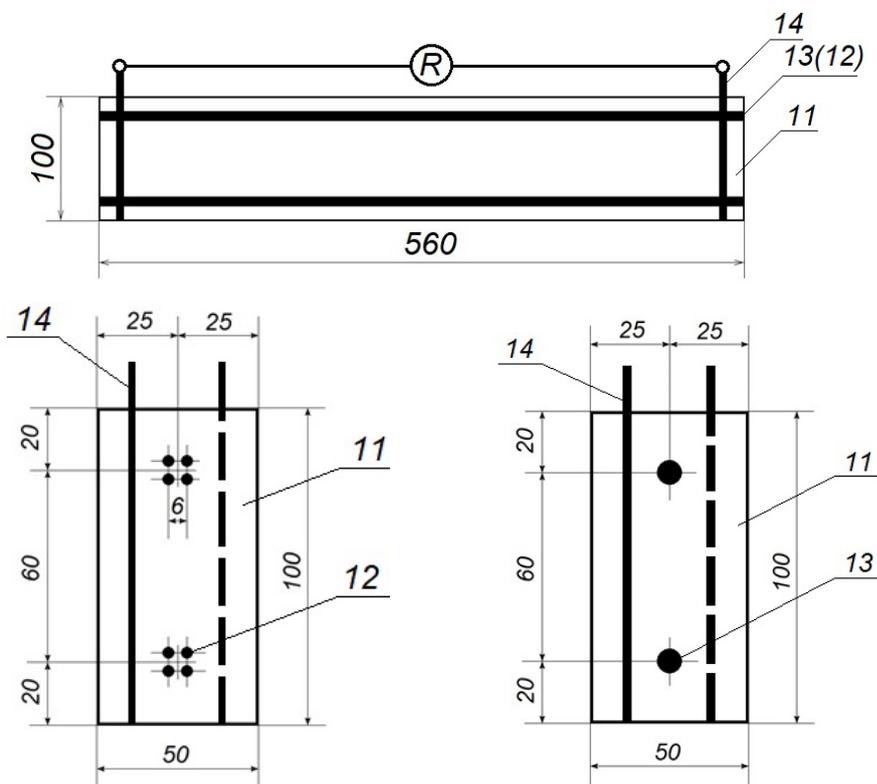


Рис. 5.7 – Моделі для визначення електричного опору

Це наближення можна кількісно охарактеризувати зміною відношення відстані від грані підрейкової площадки до центру крайнього ряду арматури до висоти перерізу шпали a/h , яке для шпал, виготовлених за [110], згідно з рис. 5.1 складає $a/h = 98/218 = 0,45$, а для шпал, виготовлених запропонованим способом – $a/h = 24/218 = 0,11$.

Величину підвищення тріщиностійкості за рахунок зниження a/h з 0,45 до 0,11 досліджено на моделях – балках із дрібнозернистого бетону з композитним арматурним стержнем з величиною a/h 0,25, 0,5 і 0,75 (рис. 5.8, а, б, в, відповідно). Випробували також балку без арматури, для якої a/h прийнято рівним 1. Балки навантажували за допомогою гідравлічного преса до утворення тріщини та визначали згинальний момент M_{cr} від сили P_{cr} , за якої утворилася тріщина: $M_{cr} = P_{cr}l/4$.

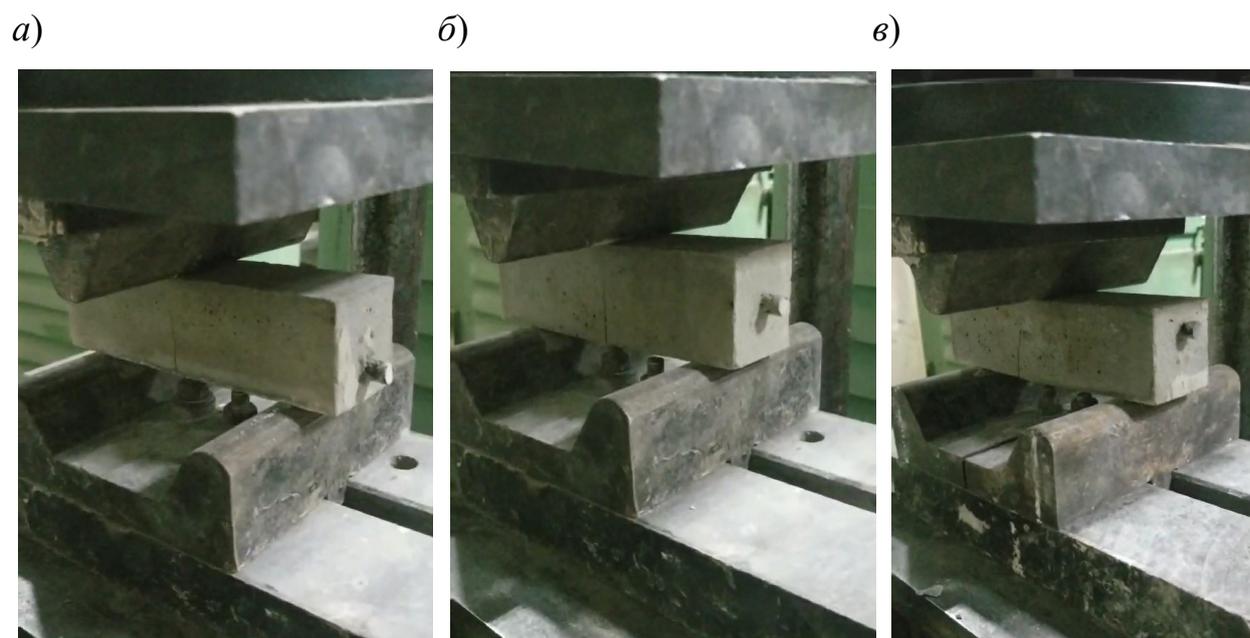


Рис. 5.8 – Моделі з величиною a/h 0,25 (а), 0,5 (б) і 0,75 (в) з утвореною тріщиною під час випробування на тріщиностійкість

На рис. 5.9 наведено отриману експериментально залежність M_{cr} від a/h . Ця залежність відповідає рівнянню, отриманому апроксимацією методом найменших квадратів:

$$M_{cr} = -25,85a/h + 26,125.$$

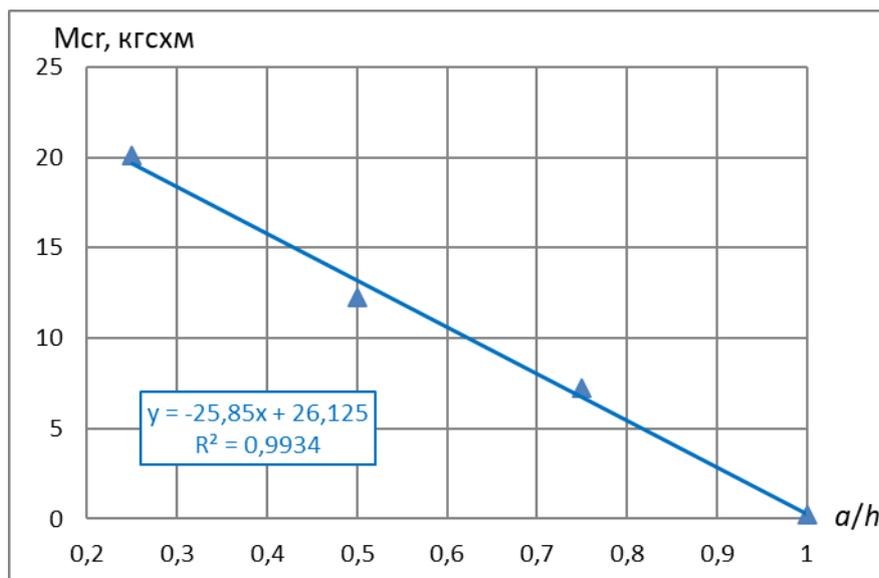


Рис. 5.9 – Залежність моменту тріщиностійкості M_{cr} від відношення a/h відстані від осі арматури до розтягнутої грані моделі a до висоти перерізу моделі h

Підставляючи у це рівняння значення a/h 0,45 і 0,11 отримаємо момент тріщиностійкості для моделей, що відповідають способу-прототипу 14,5 кгс·м, а для моделей, що відповідають заявленому способу – 23,3 кгс·м. Отже, виготовлення шпал заявленим способом має підвищити тріщиностійкість у $23,3/14,5 = 1,6$ раз.

Крім того, застосування як поперечного армування хомутів-розпірок та скоб-стяжок забезпечило підвищення стійкості шпал до утворення подовжніх тріщин.

Порівняння показників властивостей залізобетонних шпал, виготовлених способом за [110], і шпал із бетону з композитною арматурою, виготовлених запропонованим способом, наведено в табл. 5.1. Як бачимо із табл. 5.1, шпали із бетону з композитною арматурою характеризуються у 7,1–16,1 раз більшим електричним опором та у 1,6 раз більшим показником тріщиностійкості (моментом) порівняно із залізобетонними шпалами.

Таблиця 5.1 – Характеристики залізобетонних шпал, виготовлених способом за [110], і шпал з композитною арматурою, виготовлених запропонованим способом

Показники властивостей	Один. виміру	Величина для шпал		Покращення показника, крат
		залізобетонних	із бетону з композитною арматурою	
Електричний опір моделі шпали R , виміряний на постійному струмі	кОм	18,0	127	7,1
Електричний опір моделі шпали R , виміряний на перемінному струмі	«	23,9	385	16,1
Наявність в зоні анкерів подовжньої попередньо напруженої арматури, яка сприймає розтягувальні напруги та запобігає утворенню тріщин		немає	наявна	
Відношення відстані від грані підрейкової площадки до центру крайнього ряду арматури до висоти перерізу шпали a/h		0,45	0,11	
Момент тріщиностійкості моделі шпали M_{cr} в залежності від a/h	кгс×м	14,5	23,3	1,6
Наявність в зоні анкерів поперечної арматури, яка сприймає розтягувальні напруги та запобігає утворенню тріщин		немає	наявна	
Наявність поперечної арматури, яка сприймає розтягувальні напруги та запобігає утворенню тріщин		немає	наявна	

На спосіб виготовлення шпал із бетону з композитною арматурою з підвищеним електричним опором для улаштування залізничних колій подано

заявки на видачу патентів на винахід та на корисну модель та отримано патент на корисну модель [111–113] (Додаток В).

Формула винаходу та корисної моделі наступна: Спосіб виготовлення шпал із бетону з попередньо напруженою арматурою, який полягає у встановленні форми на віброплощадку в перегорнутому положенні, установленні у форму анкерів і пакету арматури з випуском її кінців через торцеві стінки форми, натягуванні арматури, передаванні натягу на форму, заповненні форми бетонною сумішшю та її ущільненні, після твердіння бетону передаванні натягу арматури з форми на бетон з обрізанням її кінців, вилученні готової шпали із форми, який відрізняється тим, що застосовують стержневу композитну арматуру, кінці стержнів закріплюють за торцеві стінки форми, в зоні підрейкових площадок шпал влаштовують хомути – розпірки, натягування арматури здійснюють стягуванням в середині шпали в поперечному вертикальному та горизонтальному напрямках з фіксацією взаємного положення стержнів вертикальними та горизонтальними скобами – стяжками.

5.2 Розроблення рекомендацій з вибору технології виробництва шпал із бетону зі сталевую та композитною арматурою

За результатами досліджень розроблено Рекомендації з вибору конструкції і технології виробництва залізобетонних шпал (Додаток Г). Рекомендації розроблені для Товариства з обмеженою відповідальністю «Гранпостач Україна» (ТОВ «ГПУ»). ТОВ «ГПУ» планувало будівництво на власній промисловій площадці технологічної лінії з виробництва залізобетонних шпал, конкурентоздатних на ринку України та країн Європейського Союзу, і для організації виробництва передбачало конструювання шпал та замовлення у світових виробників технологічного обладнання.

Рекомендації призначені для вибору конструкції і технології виробництва залізобетонних шпал і передбачають можливість виробництва шпал з композитною арматурою замість сталеві.

5.2.1 Нормативні вимоги до шпал

Шпали мають відповідати вимогам ДСТУ Б В.2.6-209:2016 «Шпали залізобетонні попередньо напружені для залізниць колії 1520 і 1435 мм. Технічні умови» зі зміною №1 та ДСТУ EN 13230-1:2018 «Залізничний транспорт. Колія. Бетонні шпали та опори. Частина 1. Загальні вимоги (EN 13230-1:2016, IDT)».

Відповідність шпал вимогам одночасно обох зазначених стандартів та/або можливість низьковитратного переналагодження технології на виробництво шпал за одним з них на інший забезпечить підвищення конкурентоздатності продукції в цілому.

5.2.2 Тип шпал

За базовий рекомендується прийняти тип шпал для безпідкладкових шурупно-дюбельних пружних рейкових скріплень, зокрема тип Ш9 за ДСТУ Б В.2.6-209:2016, та рейок типу Р65, UIC60, 60E1.

Можливість низьковитратного переналагодження технології на виробництво шпал інших типів, зокрема, Ш1, СБ3 за ДСТУ Б В.2.6-209:2016 забезпечить підвищення конкурентоздатності продукції в цілому.

5.2.3 Конструкція шпал і технічні вимоги до них

Рекомендується:

- армувати шпали попередньо напруженою стержневою арматурою або високоміцним дротом діаметром не менше 7 мм, арматуру розташовувати у два горизонтальних ряди;
- зусилля натягу арматурного пакету прийняти не менше 392 кН;
- на доповнення до зчеплення арматури з бетоном забезпечити її анкерування в бетоні на кінцях шпал;
- не допускати випуски арматури на торцях шпал, захищати торці арматурних стержнів бетоном або цементно-піщаним розчином товщиною не менше 20 мм;
- клас бетону за міцністю на стиск прийняти більш високий, ніж С35/45;
- прийняти контрольне навантаження під час випробування шпал на тріщиностійкість 147 кН для підрейкового перерізу та 117,7 кН для середнього перерізу.

5.2.4 Технологія виробництва шпал

Попередній натяг арматури рекомендується здійснювати на силові форми за анкерні пластини за допомогою високоміцних болтів, пропущених через отвори в торцях форм.

Конструкція анкерних пластин та закріплення арматури за них має унеможливити проковзування арматури в бетоні за забезпечувати поперечне армування від подовжніх тріщин на кінцях шпали, для чого:

- анкерні пластини мають бути спільними для горизонтального ряду арматури, окремими для верхнього та нижнього ряду;
- арматура має пропускатись через отвори в анкерних пластинах і закріплятись за них висадженням головок, обтискними шайбами тощо.

Конструкція анкерної пластини, зазор між нею та торцем форми має забезпечувати можливість застосування композитної арматури замість сталеві.

5.2.5 Впровадження рекомендацій

З урахуванням цих рекомендацій ТОВ «ГПУ» розроблено конструкцію залізобетонних шпал типу Ш9.2, армованих анкерованим попередньо напруженим високоміцним дротом 8Ø7 мм (креслення Ш9.2.000.00.СК), уведено в експлуатацію технологічну лінію з їх виробництва та поставлено шпали на виробництво (Додаток Е).

Випробування партії шпал на тріщиностійкість, проведені акредитованим Центром діагностики транспортних споруд УкрДУЗТ (Додаток Д), показало та підтвердило їх відповідність вимогам ДСТУ Б В.2.6-209:2016 (протокол 6/6-2025 від 07.04.2025). Шпали сертифіковано на відповідність ДСТУ Б В.2.6-209:2016 і ДСТУ EN 13230-1:2018.

5.3 Розробка способу ремонту верхньої будови колії на мостах

З використанням результатів досліджень, зокрема, фізико-механічних та електричних властивостей підрейкових основ розроблено спосіб ремонту верхньої будови колії, зокрема, її підрейкової основи, на залізничних мостах [114–118]. Спосіб полягає у використанні під час ремонту безбаластного мостового полотна залізничних мостів із залізобетонних плит оригінального прокладного шару із композитного матеріалу – дрібнозернистого бетону на основі портландцементу, армованого полімерними волокнами. На спосіб подано заявки на видачу патентів на винахід і на корисну модель та отримано патент на корисну модель [119, 120].

5.4 Оцінка соціально-економічної ефективності

Впровадження результатів досліджень, зокрема, зазначених «Рекомендацій...» (Додаток Г) шляхом уведення в експлуатацію технологічної лінії і поставлення шпал на виробництво ТОВ «ГПУ»

забезпечило соціально-економічний ефект, а саме: створено 15 робочих місць, збільшено обсяг прибутку товариства та, відповідно, збільшено обсяги надходження до бюджетів різних рівнів у вигляді обов'язкових та податкових платежів.

Інформація щодо частки прибутку від виробництва шпал у загальній структурі прибутку товариства є комерційною тайною та не підлягає розголошенню.

Акт впровадження результатів досліджень наведено у Додатку Е.

5.5 Використання результатів досліджень у навчальному процесі

Результати дисертаційного дослідження використано у навчальному процесі УкрДУЗТ за спеціальностями 273 Залізничний транспорт, 192 Будівництво та цивільна інженерія, зокрема їх освітніми програмами всіх освітніх рівнів «Залізничні споруди та колійне господарство», «Управління колійним комплексом залізниць, промислового та міського транспорту», «Промислове та цивільне будівництво» в освітніх компонентах: «Залізнична колія (улаштування та проєктування рейкової колії)», «Улаштування та утримання колії на ділянках автоблокування та електричної тяги», «Залізобетонні конструкції (спецкурс)», «Сучасні технічні рішення щодо підвищення надійності елементів залізничної колії», «Модифікація бетонів і будівельних розчинів хімічними, мінеральними добавками та полімерами», у дипломному проєктуванні.

Довідка про впровадження результатів досліджень у навчальний процес та держбюджетну тематику наведено у Додатку Е.

Висновки за розділом 5

1. Розроблено та запатентовано спосіб виготовлення шпал із бетону з попередньо напруженою арматурою, який відрізняється від існуючих

способів тим, що застосовують стержневу композитну арматуру, кінці стержнів закріплюють за торцеві стінки форми, в зоні підрейкових площадок шпал влаштовують хомути-розпірки, натягування арматури здійснюють стягуванням в середині шпали в поперечному вертикальному та горизонтальному напрямках з фіксацією взаємного положення стержнів вертикальними та горизонтальними скобами-стяжками.

2. За результатами досліджень для одного з підприємств України розроблено рекомендації з вибору конструкції і технології виробництва залізобетонних шпал, які передбачають можливість виробництва шпал з композитною арматурою замість сталеві. Рекомендації впроваджені, зокрема, розроблено конструкцію шпал, уведено в експлуатацію технологічну лінію з їх виробництва та поставлено шпали на виробництво. Впровадження забезпечило соціально-економічний ефект, а саме: створено 15 робочих місць, збільшено обсяг прибутку підприємства та, відповідно, збільшено обсяги надходження до бюджетів різних рівнів у вигляді обов'язкових та податкових платежів.

3. З використанням результатів досліджень, зокрема, фізико-механічних та електричних властивостей підрейкових основ розроблено та запатентовано спосіб ремонту верхньої будови колії, зокрема, її підрейкової основи, на залізничних мостах.

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

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. В результаті аналізу літературних та нормативних джерел, матеріалів обстежень встановлено, що на залізницях загального користування України до 96 % колій укладено на залізобетонних шпалах, яких експлуатується понад 44,3 млн. З цих шпал понад 180 тис. є непридатними через пошкодження (дефекти), спричинені механічними, електрокорозійними, корозійними впливами. Електричний опір залізобетонних шпал недостатній для ефективного запобігання втратам тягового струму, струмам витоків, електрокорозії. Заміна сталевих арматур композитною дозволить підвищити електричний опір, запобігти корозійним процесам, проте заміна ускладнюється відміною композитної арматури від сталевих за пружними властивостями і, враховуючи особливості армування шпал, залишається недослідженою.

2. Розроблено методику порівняльного дослідження напружено-деформованого стану (НДС) залізничних шпал із бетону з попередньо-напруженою сталевим дротям та композитною арматурою під поїзними навантаженнями на моделях. Методика включає розроблення моделей, розрахунковий і натурний експерименти з їх навантаження, порівняння їх результатів для верифікації результатів розрахунків шпал.

3. Розроблено оригінальну методику порівняльного дослідження впливу електричних потенціалів від струмів витоків з рейок та агресивних середовищ на шпали із бетону зі сталевим дротям та композитною арматурою на моделях. Методика включає розробку моделей, їх експозицію під цими впливами та дослідження їх наслідків, у т.ч. новим методом наноіндентування, який дозволяє визначати мікромеханічні властивості цементного каменю, що залежать від ступеня його електроміграційного вилуговування.

4. Розроблено та виготовлено фізичні моделі шпал із бетону зі сталевую дротяною та композитною арматурою, побудовано їх скінчено-елементні моделі, виконано розрахунковий і натурний експерименти з їх навантаження.

4.1. Встановлено, що по мірі навантаження моделей та збільшення моменту від нього деформування розвивається стадіями: утворення тріщин в розтягнутій зоні; їх розвиток до пластичного шарніру; руйнування за рахунок проковзування арматури в бетоні. На зазначені моменти вид арматури вплинув у меншому ступені, ніж зусилля попереднього натягу арматури.

4.2 Порівняльним аналізом результатів, отриманих розрахунком та експериментально на моделях, знайдено величини поправочних коефіцієнтів для визначення розрахунком моменту тріщиностійкості та руйнівного моменту шпал – відповідно, 2,24 і 0,9 для шпал зі сталевую дротяною арматурою і 2,39 і 0,98 для шпал з композитною арматурою.

4.3 В результаті аналізу НДС шпал під поїзним навантаженням встановлено, що за однакового попереднього натягу арматурного пакету 353 кН максимальні напруження складають для шпал з композитною та сталевую дротяною арматурою: стискаючі – 16,1 і 16,7 МПа, розтягувальні – 1,1 і 0,12 МПа. Ці напруження менші границі міцності бетону на стиск і розтяг, отже умови міцності та тріщиностійкості виконуються. Зниження попереднього напруження композитної арматури призводить до незначного збільшення максимальних стискаючих напружень, проте розтягувальні напруження збільшуються до 6–7 МПа, що перевищує границю міцності на розтяг та обумовлює роботу шпал з тріщинами.

5. Виконано аналіз впливу заміни сталеві дротяної арматури композитною на електрофізичні та електрокорозійні властивості шпал.

5.1. Розрахунком та експериментально встановлено, що за рахунок заміни сталеві дротяної арматури діелектричною композитною електричний опір шпал у суху та вологу погоду збільшується в 6–16 раз, отже, на порядок, а у дощову погоду – на декілька порядків, що забезпечить відповідне

зменшення втрати тягових струмів та струмів витоку, підвищить надійність роботи сигнальних рейкових кіл.

5.2 Експериментально встановлено, що у залізобетонних шпалах з випусками арматури із торців струм стікає з рейок і скріплень через поровий електроліт бетону (насичений розчин $Ca(OH)_2$) на арматуру, а з її випусків на торцях шпал – через баласт у земляне полотно, спричиняючи електрокорозію арматури на кінцях шпал. Відносно бетону арматура дренає струми і він не зазнає електрокорозії (електроміграційного вилуговування). У випадку заміни сталеві арматури діелектричною композитною струм стікає виключно через бетон. Така арматура не дренає і не розподіляє струм, створюючи умови для електрокорозії бетону, якій необхідно запобігти підвищенням його щільності, а, отже, й класу за міцністю.

5.3 Встановлено, що під впливом електричного потенціалу і струму інтенсифікується дифузія в бетон іонів, агресивних до сталеві арматури і нейтральних до композитної, отже, шпали з композитною арматурою не зазнаватимуть пошкоджень в умовах потрапляння на електрифіковану колію розчинних речовин.

6. Розроблено та запатентовано спосіб виготовлення шпал із бетону з попередньо напруженою арматурою. За результатами досліджень для одного з підприємств України розроблено рекомендації з вибору конструкції і технології виробництва залізобетонних шпал, які передбачають можливість виробництва шпал з композитною арматурою. Рекомендації впроваджені, зокрема, розроблено конструкцію шпал, уведено в експлуатацію технологічну лінію з їх виробництва та поставлено шпали на виробництво. Впровадження забезпечило соціально-економічний ефект, а саме: створено 15 робочих місць, збільшено обсяг прибутку підприємства та, відповідно, збільшено обсяги надходження до бюджетів різних рівнів обов'язкових та податкових платежів. Результати дисертаційного дослідження впроваджені у навчальний процес з підготовки бакалаврів, магістрів, докторів філософії за спеціальностями 273 Залізничний транспорт і 192 Будівництво та цивільна інженерія.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Даніленко Е.І. Залізнична колія. Улаштування, проектування і розрахунки, взаємодія з рухомим складом. Інпрес, Київ, 2010. т. 1. 528 с. т. 2. 456 с.
2. Основні показники по колійному господарству станом на 01.01.2020 і 01.01.2021. ЦП, АТ «Укрзалізниця», 2021.
3. ДБН В.2.3-19:2025 Залізничні колії 1520 мм. Норми проектування https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3719167058865292815?doc_type=2
4. Правил технічної експлуатації залізничного транспорту промислових підприємств. К.: 2010. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0237-10#Text>
5. Kurhan D., Kurhan M., Hmelevska N. Development of the High-Speed Running of Trains in Ukraine for Integration with the International Railway Network *Acta Polytechnica Hungarica* 19(3) (2022) 207–218. <https://doi.org/10.12700/APH.19.3.2022.3.16>
6. Курган М.Б., Курган Д.М., Тютюкін О.Л. Теоретичне та практичне обґрунтування перебудови мережі залізниць України на Європейський стандарт. ЖурФонд, Дніпро. 2025. 256 с.
7. Хмелевська Н.П. Інновації реконструкції плану колії під європейські норми для впровадження швидкісного руху поїздів. Дис... PhD, 275, УДУНТ, Дніпро. 2025. 192 с. https://ust.edu.ua/wp-content/uploads/2025/07/hmelevska-n.p.-dysertacziya_compressed.pdf
8. ДБН В.2.3-19:2025 Залізничні колії 1435 мм. Норми проектування https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3719175754932552854?doc_type=2
9. ДСТУ 9002:2020 Споруди транспорту. Класифікація, періодичність призначення та проведення планово-запобіжних ремонтів залізничних колій. https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=89558
10. ЦП-0269 Інструкція з улаштування та утримання колії залізниць України. Затверджена наказом Укрзалізничі від 01.03.2012 №072Ц.

11. Правила технічної експлуатації залізниць України. Затверджені наказом від 20.12.1996 №411, зареєстровані Міністерством юстиції України 25.02.1997 №50/1854.

12. ДСТУ Б В.2.6-209:2016 Шпали залізобетонні попередньо напружені для залізниць колії 1520 і 1435 мм. Технічні умови. https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=64108

13. ДСТУ Б В.2.6-209:2016 Шпали залізобетонні попередньо напружені для залізниць колії 1520 і 1435 мм. Технічні умови. Зміна № 1. https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=102264

14. Золотарский А.Ф., Евдокимов Б.А., Исаев Н.М., Крысанов Л.Г., Серебренников В.В., Федулов В.Ф. Железобетонные шпалы для рельсового пути. Под ред. А.Ф. Золотарского. Транспорт, 1980. 270 с.

15. Железобетонные шпалы: вопросы изготовления и эксплуатации. Под ред. О.П. Мчедлова-Петросяна *Труды ХИИТа* 86. 1966. 64 с.

16. Железобетонные шпалы: проблемы надежности и долговечности. Под ред. О.П. Мчедлова-Петросяна *Труды ХИИТа* 109. 1969. 64 с.

17. Технологическое обеспечение долговечности железобетонных шпал. Под ред. О.П. Мчедлова-Петросяна *Труды ХИИТа* 122. 1971. 64 с.

18. ДСТУ 7571:2014. Рухомий склад залізниць. Норми допустимого впливу на залізничну колію. http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=63585

19. Concrete Sleeper Production. Salcef Group. <https://www.youtube.com/watch?v=VCgsecotQkA>

20. Production of concrete track sleepers. Construcs-Weckenmann. <https://www.youtube.com/watch?v=E90L89yWkLQ>

21. Prestressed reinforced concrete sleepers, type “Ш9.2”. ТОВ “ГПУ” (2025)

22. Concrete Sleeper Production. Leonhard Moll. Vollert Anlagenbau. <https://www.youtube.com/watch?v=hoXnjwvyc7M>

23. ЦП-0150 Технічні вказівки з використання старопридатних

матеріалів верхньої будови колії на залізницях України. НКТБ ЦП Укрзалізниці, Київ. 2006. 56 с.

24. ДСТУ 9273:2024 Настанова щодо обстеження будівель і споруд для визначення та оцінювання їхнього технічного стану.

25. ВНД УЗ 32.2.03.018-2013 (ЦП-0285) Класифікація і каталог дефектів і пошкоджень рейок на залізницях України.

26. Проведення досліджень по встановленню причин руйнування залізобетонних шпал та розробка рекомендацій по підвищенню міцності бетону: Звіт з НДР. В.В.Рибкін, Ю.Л.Заяц, В.П.Лисняк, В.В.Коваленко та ін. ДНУЗТ, Дніпропетровськ. 2011. 164 с.

27. Дослідження причин передчасного руйнування залізобетонних шпал Ш1-3 виробництва ПрАТ «Коростенський завод ЗБШ»: Звіт з НДР. В.В.Коваленко, С.В.Коваленко, Ю.Л.Заяць. ДНУЗТ, Дніпропетровськ. 2015. 33 с.

28. Пшінько П.О. Підвищення надійності залізничних залізобетонних шпал. Автореф. дис... к.т.н. 05.23.01. ПДАБА, Дніпро. 2012. 20 с.

29. Провести фізико-хімічні дослідження бетону залізобетонних шпал та надати висновок щодо причин його корозії: Звіт про НДР. Л.О.Шейніч, М.Г.Миколаєць, Є.О. Крилов, М.С. Мудрик. НДІБК, Київ. 2019. 129 с.

30. Плуґін А.А., Крикун О.П., Зінченко В.В., Борзяк О.С., Дудін О.А. Вплив корозії бетону від взаємодії лугів цементу з реакційноздатними заповнювачами на пошкодження залізобетонних шпал у колії *Збірник наукових праць УкрДУЗТ*. 2021. Вип. 196. С. 43-57.
<https://doi.org/10.18664/1994-7852.196.2021.241657>

31. Рояк Г.С. Внутренняя коррозия бетона. *Тр. ЦНИИС* 210. 2002. С. 156.

32. Bodeker W. Alkalireaktion im Bauwerksbeton – Ein Erfahrungsbericht. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (2003) 539 p.

33. Stark J. Alkali-Kieelsäure-Reaktion. Finger-Institutes für Baustoffkunde, Weimar (2008) 139 p.

34. Jensen V., Merz C. Alkali-aggregate reaction in Norway and Switzerland – survey investigations and structural damage. Proceedings of the 13th ICAAR, Trondheim (2008) 785–795.
35. Andiç-Çakır, Ö., Çopuroğlu, O., Katayama, T. A Review of Alkali-Silica Reactivity in Turkey: A Case Study From Izmir, west Anatolia. Proceedings of the 14th ICAAR, Austin (2012) 10 p.
36. Pyu H., Ferreira M., Holt E. Assessing the extent of ASR in Finland. Proceedings of the 14th ICAAR, Austin (2012) 6 p.
37. Розенталь Н.К., Любарская Г.В. Коррозия бетона при взаимодействии щелочей с диоксидом кремния заполнителя *Бетон и железобетон* 1(6). 2012. С. 50–60.
38. Krivenko P., Gelevera O., Kovalchuk O., Bumanis G., Korjakins A. Alkali-aggregate reaction in alkali-activated cement concretes. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 660(1) (2019). 012002
39. [Plugin, A.A.](#), [Miroshnichenko, S.V.](#), [Lobiak, O.V.](#), [Kalinin, O.A.](#), [Plugin, D.A.](#) Crack resistance of reinforced-concrete sleepers with elastic rail fastening systems without base-plate. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 1002(1) (2020) 012010. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1002/1/012010>
40. Плугін А.А., Мірошніченко С.В., Калінін О.А., Ляху Л.В., Ганжела С.Ю. Експериментальні дослідження тріщиностійкості залізобетонних шпал з безпідкладковим пружним рейковим скріпленням *Збірник наукових праць УкрДУЗТ*. 2020. Вип. 192. С. 11–23. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.192.2021.223738>
41. Плугін А.А., Плугін Д.А., Мірошніченко С.В., Калінін О.А., Крикун О.П. Дослідження бетону залізобетонних шпал, що зазнали пошкоджень під час експлуатації *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*. 2021. Вип. 20. С. 56-65. <https://doi.org/10.15802/bttrp2021/245342>
42. Плугін О.А. Дослідження впливу величини напруги пульсуючого однонаправленого електричного поля на електрокорозію бетону *Збірник наукових праць УкрДУЗТ*. 2010. Вип. 115. С. 56-67.

43. Плугін О.А., Борзяк О.С., Мартинова В.Б., Халюшев О.К. Електричні впливи на бетон (електрообробка та захист від електрокорозії бетонів, виробів і конструкцій із них). За ред. А.А.Плугіна і М.М.Зайченка. Форт, Харків. 2013. 300 с.

44. Плугін А.А., Борзяк О.С., Плугін О.А., Крикун О.П., Зінченко В.В. Розвиток уявлень про електрокорозію конструкцій залізничної колії та удосконалення способів їхнього захисту з застосуванням електропровідних композицій *Збірник наукових праць УкрДУЗТ*. 2023. Вип. 204. С. 35-52. URL: <http://doi.org/10.18664/1994-7852.204.2023.283877>

45. Eichler T., Isecke B. Stray current-induced corrosion in cathodic protection installations of steel-reinforced concrete structures: FEM study of the critical parameters. URL: <https://doi.org/10.1002/maco.202011620>.

46. Liu Y.-C., Chang E.-C., Shyu J.-L., Chen X.-G. Dynamic Analysis of the Leakage Current Corrosion for the Non-Grounded DC Railway Systems. *International Journal of Electrical Energy*. 3(4). 257-261 (2015).

47. Duranceau S. J., Johnson W. J., Pfeiffer-Wilder R. J. A study examining the effect of stray current on the integrity of continuous and discontinuous reinforcing bars. *Experimental Techniques*. 35 (2011). 53-58.

48. Bertolini L., Carsana M., Pedferri P. Corrosion behaviour of steel in concrete in the presence of stray current. *Corrosion Science*. 49 (2007). 1056–1068.

49. Myong J., Kim J., Gwon K. Investigation of the forecast algorithm for assessing the risk of electrocorrosion in the lining of railway tunnel. *Transport Technician* 1 (3) (2020).

50. Mindess S. Resistance of concrete to destructive agencies. In book: *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*, Elsevier. (2019) 251–283.

51. Bae Y., Pyo S. Ultra high performance concrete (UHPC) sleeper: Structural design and performance *Engineering Structures* 210 (2020) 110374.

52. Sadeghi J., Tolou Kian A. R., Shater Khabbazi A. Improvement of mechanical properties of railway track concrete sleepers using steel fibers *Journal*

of Materials in Civil Engineering 28 (11) (2016) 04016131

53. Tang K. Stray current induced corrosion of steel fibre reinforced concrete. *Cement and Concrete Research*. 100 (2017). 445-456.

54. Kurdowski W. *Chemia Cementu i Betonu*. Kraków (2010) 728 str.

55. Коваленко В.В., Заяць Ю.Л., Пшінько П.О. Дослідження причин передчасного руйнування залізобетонних шпал на Знам'янській дистанції колії ПЧ-10 Одеської залізниці *Вісник ДНУЗТ ім. В. Лазаряна* 6. 2015. С. 149–163.

56. Han B., Zhang L., Ou J. Electrically Conductive Concrete. In book: *Smart and Multifunctional Concrete Toward Sustainable Infrastructures* (2017) 247–259.

57. Cordon H. C. F., Tadini F. B., Akiyama G. A., de Andrade V. O., da Silva R. C. Development of electrically conductive concrete *Cerâmica* 66 (2020) 377.

58. Плугін А.А., Борзяк О.С., Плугін О.А., Крикун О.П., Зінченко В.В. Розвиток уявлень про електрокорозію конструкцій залізничної колії та удосконалення способів їхнього захисту з застосуванням електропровідних композицій *Збірник наукових праць УкрДУЗТ*. 2023. Вип. 204. С. 35–52.
<http://doi.org/10.18664/1994-7852.204.2023.283877>

59. Chen Z., Koleva D. Corrosion behavior of reinforcing steel undergoing stray current and anodic polarization *Materials* 14(2) (2021) 261
<https://doi.org/10.3390/Fma14020261>

60. Tang K. Stray current induced corrosion of steel fibre reinforced concrete *Cement and Concrete Research* 100 (2017) 445–456.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.08.004>

61. Babaahmadi A., Tang L., Abbas Z., Zack T., Martensson P. Development of an electro-chemical accelerated ageing method for leaching of calcium from cementitious materials *Materials and Structures* 49 (2016) 705–718.
<https://doi.org/10.1617/s11527-015-0531-8>

62. Eichler T., Isecke B. Stray current-induced corrosion in cathodic protection installations of steel-reinforced concrete structures: FEM study of the critical parameters. <https://doi.org/10.1002/maco.202011620>

63. Howind T., Hughes J.J., Zhu W. Correlation of Ca/Si and micromechanical properties in leached grey and white cement pastes. 34thInternational Conference on Cement Microscopy, ICMA 2012. https://www.researchgate.net/publication/288709407_Correlation_of_CaSi_and_micromechanical_properties_in_leached_grey_and_white_cement_pastes
64. 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 Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 1376 (2024) 012018. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1376/1/012018>
65. Ogunsola A., Sandrolini L., Mariscotti A. Evaluation of stray current from a DC-electrified railway withintegrated electric–electromechanical modeling and traffic simulation *IEEE Transactions on IndustryApplications* 51 (2015) 5431–5441.
66. Cai Z., Hao C. Evaluation of metro stray current corrosion based on finite element model. *The Institution of Engineering and Technology Journal of engineering* 16 (2019) 2261–2265.
67. Bertolini L., Carsana M., Pedferri P. Corrosion behaviour of steel in concrete in the presenceof stray current. Dipartimento di Chimica, Politecnico di Milano, *Materiali e Ingegneria Chimica «G.Natta», via Mancinelli 7* (2013)
68. Wang K., Wu Q.-S., Chen M.-C., Xie L. Corrosion Fatigue of Reinforced Concrete in the Presence of Stray Current. 2011 International Conference on Electric Technology and Civil Engineering (ICETCE), Lushan, China (2011) 1133–1136.
69. Yee J.J., Khong S.C., Che J.L., Chin S.C. Sustainable Materials in Concrete Railway Sleepers: A Review of Current Developments and Future Prospects *Journal of Chemical Engineering and Industrial Biotechnology* 10(1) (2024) 1–16. <https://doi.org/10.15282/jceib.v10i1.10292>
70. Mbatha A.J., Alugongo A.A., Nkomo N.Z. A Review of Composites Sleepers Used in the Railway Structure *International Journal of Engineering*

Trends and Technology 72(12) (2024) 360–366.
<https://doi.org/10.14445/22315381/IJETT-V72I12P130>

71. Mirza O., Camille C., Clarke T. Optimisation of Macro-Synthetic Fibre Reinforced Concrete (MSFRC) as Alternative Railway Sleepers. In book: *Engineering Materials, Structures, Systems and Methods for a More Sustainable Future*. Taylor & Francis (2025) <https://doi.org/10.1201/9781003677895-5>

72. Ferdousa W., Manalob A., Al Ajarmehc O., Mohammedd Ali A., Choman S., Yuf P., Khotbehsarag M.M., Schubelh P. Static behaviour of glass fibre reinforced novel compositesleepers for mainline railway track *Engineering Structures* 229 (2021) 111627.

73. Guoqing J., Hao F., Peyman A. Lateral displacement of different types of steel sleepers on ballastedtrack *Construction and Building Materials* 186 (2018) 1268–1275.

74. Raj A., Nagarajan P., Shashikala A.P. A Review on the Development of New Materials forConstruction of Prestressed Concrete Railway Sleepers *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 330 (2018) 012129.

75. Shokrieh Mahmood M., Rahmat Meysam. On the reinforcement of concrete sleepers by composite materials.*Composite Structures*, 76 (2006) 326–337.

76. Клімов Ю.А., Вітковський Ю.А., Солдатченко О.С. Використання неметалевої композитної арматури для армування бетонних конструкцій *Будівельні матеріали, виробу та санітарна техніка*. 2011. Вип. 42. С. 13–17.

77. Солдатченко О.С. Міцність, жорсткість та тріщиностійкість згинальних конструкцій зі склопластиковою і базальтопластиковою композитною арматурою. Дис... к.т.н. 05.23.01. Київ. 2012. 160 с.

78. Ďurech, D. Anchoring method for prestressing of FRP reinforcement. Singapore, 13 (2010).

79. Iman Ch., Mohsen K., Mohd Z.J., Payam Sh. Experimental study of the behavior of the strength atbending of concrete beams reinforced by PKA and

comparison of the limiting load moment with 10. *ACI Journal of Civil Engineering and Building Technologies* 2(1) (2010) 27–42.

80. Denvid L., Pam H.J. Experimental study of hybrid FRP reinforced concrete beams *Engineering Structures* 32 (2010) 3857–3865.
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2010.08.028>

81. Toutanji H., Saafi M. Behavior of bent concrete beams reinforced with fiberglass reinforcement *Building Journal ACI* 5(97) (2000) 712–719.
https://www.researchgate.net/publication/279540122_Flexural_behavior_of_concrete_beams_reinforced_with_glass_fiber-reinforced_polymer_GFRP_bars

82. Chitsazan I., Kobraei M., Jumaat M.Z., Shafigh P. An experimental study on the flexural behavior of FRPRC beams and a comparison of the ultimate moment capacity with *ACI Journal of Civil Engineering and Construction Technology* 1(2) (2010) 27–42.

https://eprints.um.edu.my/6018/1/An_experimental_study_on_the_flexural_behaviour_of_FRP_RC_bemas_and_comparison_of_the_ultimate_moment_capacity_with_A.pdf

83. Гримак О.Я. Міцність, деформативність і тріщиностійкість бетонних балкових конструкцій мостів із базальтопластиковою арматурою. Дис... к.т.н. 05.23.01. НУ «Львівська політехніка». 2019. 180 с.

84. Schmidt J.W., Täljsten B., Bennitz A., Cowi A.S. *FRP tendon anchorage in posttensioned concrete structures in Concrete Repair Rehabilitation and Retrofitting II*, pp.419-420 (2008)

<https://findit.dtu.dk/en/catalog/537f0d8d7401dbcc1200ee27>

85. Chang X., Wang X., Liu C., Wu Z., Noori M. Anchoring and stressing methods for prestressed FRP plates: State-of-the-art review *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 0(0) (2024) 1–21.

<https://doi.org/10.1177/07316844241258864>

86. A. Plugin, O. Kaliuzhna, O. Lobiak, D. Plugin, E. Nadzhafov, M. Lagler, Regarding the replacement of steel reinforcement in prestressed concrete sleepers with composite rebars *AIP Conf. Proc.* 3064 (2024) 060003.
<https://doi.org/10.1063/5.0199575>

87. Kosarchuk V.V., Tverdomed V.M., Bambura O.V., Kovalchuk V.V., Demchenko M.E. Influence of Track Design Parameters on the Level of Contact Stresses in Railway Rails: A Survey *Strength of Materials* 57(3) (2025) 525–539. <https://doi.org/10.1007/s11223-025-00785-2>

88. Dižo J., Lovska A., Blatnický M., Melnik R., Koziak S. Analysis of long freight wagon running safety depending on wheel/rail contact friction coefficient *Transportation Research Procedia* 93 (2026) 353–359. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2025.11.054>

89. Potapov D., Vitolberg V., Shumyk D., Boyko V., Kulik S. Study into stresses in rail track elements from high-speed rolling stock in Ukrainian main lines *AIP Conf. Proc.* 2684 (2023) 020010 DOI: 10.1063/5.0120022

90. Наджафов Е.Ф., Плуґін Д.А., Плуґін А.А., Лобяк О.В. Несуча здатність опор контактної мережі залізниць із бетону, армованого композитною арматурою. Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика. 2024. Вип. 26. С. 54–62. <https://doi.org/10.15802/bttrp2024/315300>

91. Наджафов Е.Ф.о. Бетонні опорні конструкції з неметалевим армуванням для ЛЕП і контактних мереж. Дис... PhD, 192, УкрДУЗТ, Харків. 2025. 227 с. https://kart.edu.ua/wp-content/uploads/2025/05/2025_dysertaciya_najafov.pdf

92. ДСТУ Б В.2.7-312:2016 Арматура неметалева композитна базальтова періодичного профілю. Загальні технічні умови.

93. Technobasalt. Арматура базальтова. <https://technobasalt.com/reinforcing-materials-from-basalt-ua/basalt-rebar-ua/>

94. Трикоз Л.В., Зінченко О.С., Никитинський А.В. Визначення міцнісних та структурних характеристик цементно-піщаних розчинів з використанням рециклінгових наповнювачів Науковий вісник будівництва. 2024. Вип. 111. С. 135-141. <https://doi.org/10.33042/2311-7257.2024.111.1.17>

95. A. Lobiak, A. Plugin, L. Kravtsiv, O. Kovalova O. Modelling of motorway bridge spans under modernization with consideration of rheological properties of the materials *Matec Web of Conferences* 234 (2018) 04004. <https://doi.org/10.1051/matecconf/201823404004>

96. Gorodetsky A. Computer models of structures, Fact, Kyiv (2007) 394 p.
97. Плугін А.А., Zhu W., Муригін М.А., Плугін Д.А., Муригіна Н.О. Нові методи досліджень електрокорозійних процесів у конструкціях із бетону II Всеукраїнська науково-практична конференція «BIM-технології в будівництві: Досвід та інновації». Харків (15–16.12.2023). С. 94–95. https://dmg.kname.edu.ua/images/other/Tezi_BIM_2023.pdf
98. Integrated rail freight optimisation in Ukraine: Railway sleepers, rolling stock and logistics. UK–Ukraine R&I twinning grants scheme final report. Project #11150. University West of Scotland, Ukrainian State University of Railway Transport.
99. Plugin A., Murygin M., Plugin D., Najafov E., Musiienko S., Lobiak O. Establishing patterns in the stressed-strained state of concrete sleepers with prestressed composite reinforcement and their models. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies* 5 (7) (137) (2025), 6–16. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.341427>
100. Муригін М.А., Наджафов Е.Ф., Плугін А.А., Плугін Д.А., Лобяк О.В. Дослідження моделей попередньо напружених конструкцій із бетону зі сталевую та композитною арматурою *Збірник тез міжнародної науково-технічної конференції «Структуроутворення та руйнування композиційних будівельних матеріалів та конструкцій»* Одеса (22–23.04.2025). С. 50–53.
101. Плугін А.А., Панченко С.В., Муригін М.А., Плугін Д.А., Наджафов Е.Ф., Лобяк О.В. Порівняльні дослідження моделей бетонних конструкцій, армованих попередньо напруженою сталевую та композитною арматурою *Тези доповідей 10 Міжнародної конференції «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд і будівель на залізничному транспорті» (ТрансБуд-2024)* Харків (20–22.11.2024). С. 45–48. <https://kart.edu.ua/wp-content/uploads/2024/09/tezi-transbud-2024-2.pdf>
102. Плугін А.А., Калюжна О.В., Муригін М.А., Наджафов Е.Ф., Плугін Д.А. Перспективи застосування композитної арматури в шпалах із бетону Міжнародна науково-технічна конференція «Органічні і мінеральні в'язучі

та дорожні бетони на їх основі» Харків (08–09.11.2022). С. 107–113.
https://rcf.khadi.kharkov.ua/fileadmin/user_upload/Збірник_тез_-_Редакція_.pdf

103. Чернявський В.Л. Адаптація бетону і залізобетону – ресурс довговічності будівельних конструкцій *Будівництво України*. 2007. Вип. 3. С. 2–5.

104. Пługін А.А., Муригін М.А., Мусієнко С.М., Редько І.О., Геворкян Е.С. Порівняльні дослідження впливу електричних потенціалів на корозійні процеси в залізничних шпалах із бетону зі сталевую та композитною арматурою *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2025. Вип. 213. С. 61–82. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.213.2025.341989>

105. Пługін О.А., Пługін А.А., Геворкян Е.С., Муригін М.А. Механізм і кінетика електрокорозії рейкової сталі та ресурс рейок у залізничних тунелях *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2025. Вип. 212. С. 114–132. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.212.2025.336481>

106. Пługін А.А., Муригін М.А., Крикун О.П., Наджафов Е.Ф., Зінченко В.В. Експериментальні дослідження впливу електричних потенціалів на корозійні процеси в залізобетонних шпалах *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2024. Вип. 207. С. 38–51. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.207.2024.301944>

107. Мусієнко С.М., Куцин К.О., Муригін М.А., Пługін А.А. Щодо впливу тріщиностійкості залізобетонних шпал на роботу контактної мережі та систем СЦБ *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті 3* (Додаток. Тези стендових доповідей та виступів учасників конференції). 2025. С. 51–52. https://kart.edu.ua/wp-content/uploads/2025/09/dodatok-do-zhurnalu-ikszt-3-2025-z-tezami-dopovidej_38-mnnpk.pdf

108. Plugin A.N., Plugin A.A., Plugin O., Dudin O., Borzyak O. Research of influence of leakage currents and stray currents on railways on buildings and

constructions *17 Internationale Baustofftagung*, Weimar, 2 (2009) 1151–1156.

<https://www.researchgate.net/publication/331473805>

109. Патент 82697, МПК В28В 23/02 , опубл. Бюл № 9, 2008 р.

110. Патент 83837, МПК Е01В 3/00 В28В 23/02, опубл. Бюл № 16, 2008 р.

111. Муригін М.А., Пługін А.А., Пługін Д.А., Лобяк О.В. Залізничні шпали з бетону, армованого композитною арматурою *Збірник тез міжнародної науково-технічної конференції «Структурування та руйнування композиційних будівельних матеріалів та конструкцій»* Одеса (23.04.2024). С. 92–95. <https://drive.google.com/file/d/1jl7vWluCtPrF4HO4P4BpNs-at6XPvwR/view>

112. Спосіб виготовлення шпал із бетону з попередньо напруженою арматурою. МПК Е01В 3/34, Е04G 21/12. УкрДУЗТ. Пługін А.А., Пługін Д.А., Муригін М.А., Панченко С.В., Трикоз Л.В., Чжи В, (Zhu W.), Лобяк О.В., Муригін А.В., Пługін О.А., Калюжна О.В., Муригіна Н.О., Дудін О.А., Наджафов Е.Ф.о. Заявка на видачу патенту на винахід № а 2023 06180. Заявл.18.12.2023.

113. Пат. на кор. модель 159801 UA МПК Е01В 3/34 (2006/01) Е04G 21/12 (2006.01) Спосіб виготовлення шпал із бетону з попередньо напруженою арматурою. МПК Е01В 3/34, Е04G 21/12. УкрДУЗТ. Пługін А.А., Пługін Д.А., Муригін М.А., Панченко С.В., Трикоз Л.В., Чжи В, (Zhu W.), Лобяк О.В., Муригін А.В., Пługін О.А., Калюжна О.В., Муригіна Н.О., Дудін О.А., Наджафов Е.Ф.о. Заявл. 18.12.2023, заявка № u202306182, опубл. 09.07.2025, бюл.№ 28.

114. Plugin A., Murygina N., Pluhin O., Murygin M., Musienko S. Physical-mechanical properties of composite material based on polyester fibres and mineral binder *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 1499 (2025) 012074. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1499/1/012074>

115. 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*. 2023. Вип. 206. С. 82–101. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.206.2023.296619>

116. 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 міжнародної науково-технічної конференції «Структуроутворення та руйнування композиційних будівельних матеріалів та конструкцій»* Одеса (23.04.2024). С. 111–114.

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

117. 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 Міжнародної конференції «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд і будівель на залізничному транспорті» (ТрансБуд-2024)* Харків (20–22.11.2024). С. 52–55. <https://kart.edu.ua/wp-content/uploads/2024/09/tezi-transbud-2024-2.pdf>

118. 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 *Матеріали 82 Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту»* Дніпро (20–21.04.2023) За ред. Ю.С. Пройдака, Р.В. Маркуля. С. 364–366.

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

119. 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. Zhy, 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

120. 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. 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. Заявл. 28.08.2023, заявка № u 2023 04061, опубл.17.01.2024, бюл. №3/2024.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

КІЛЬКІСТЬ І СТАН ШПАЛ, ЩО ЛЕЖАТЬ У КОЛІ
В ХАРКІВСЬКІЙ ДИСТАНЦІЇ КОЛІЇ ЗА СТАНОМ НА 01.11.2025

Таблиця А.1 – Кількість і стан шпал, що лежать у колії в Харківській дистанції колії за станом на 01.11.2025

Напрямки, кілометри, станції	Рід шпал	Кількість шпал, що лежать у колії, шт.		Кількість шпал в куцах із трьох і більше непридатних, шт.
		усього	у т.ч. непридатних, що підлягають заміні	
1	2	3	4	5
Головні колії				
Белгород – Харків Сорт. непарна	Д	5	0	0
	З	72491	113	0
Харків Сорт. – Харків Пас. непарна	Д	8	4	0
	З	9766	0	0
Харків Пас. – Мерефа непарна	Д	8	0	0
	З	46155	45	0
Мерефа – Лозова непарна	Д	0	0	0
	З	2486	2	0
Белгород – Харків Сорт. парна	Д	9	0	0
	З	71520	248	0
Харків Сорт. – Харків Пас. парна	Д	18	12	0
	З	8916	0	0
Харків Пас. – Мерефа парна	Д	49	12	1
	З	44330	20	0
Мерефа – Лозова парна	Д	0	0	0
	З	2325	22	0
Новожанове – Пост Уди одноколійна	Д	0	0	0
	З	70	0	0
Харків Пас. – Нова Баварія непарна	Д	20	5	0
	З	10543	4	0
Нова Баварія – Люботин непарна	Д	0	0	0
	З	28318	37	0
Харків Пас. – Нова Баварія парна	Д	19	4	0
	З	10855	1	0
Нова Баварія – Люботин парна	Д	0	0	0
	З	28025	44	0
Мерефа – Красноград одноколійн.	Д	0	0	0
	З	8635	2	0
Мерефа – Люботин одноколійна	Д	0	0	0
	З	14955	10	0

Продовження табл. А.1

1	2	3	4	5
Мерефа – Зміїв одноколійна	Д	9	0	0
	З	27672	0	0
Харків Пас. – Зелений Колодязь одноколійна	Д	28	5	0
	З	6742	5	0
Буди – Шпаківка одноколійна	Д	0	0	0
	З	26339	13	0
Буди – Шпаківка з'єднув.	Д	0	0	0
	З	481	0	0
Шпаківка – Нова Баварія одноколійна	Д	0	0	0
	З	10387	1	0
Харків Сорт. – Харків Пас. парк «Н» непарна	Д	0	0	0
	З	11082	16	0
Харків Сорт. – Харків Пас. парк «Н» парна	Д	0	0	0
	З	11071	0	0
Основа – Харків Пас. парк «Н» пасажирська непарна	Д	0	0	0
	З	2469	0	0
Основа – Харків Пас. парк «Н» пасажирська парна	Д	0	0	0
	З	2605	0	0
Основа – Харків Пас. парк «Н» вантажна непарна	Д	0	0	0
	З	2002	0	0
Основа – Харків Пас. парк «Н» вантажна парна	Д	0	0	0
	З	3546	0	0
Харків Пас. парк «Н» – Харків Слобід. непарна	Д	7	0	0
	З	3699	1	0
Харків Пас. парк «Н» – Харків Слобід. парна	Д	0	0	0
	З	941	0	0
Харків Сорт. – Харків Товар. з'єднувальна	Д	0	0	0
	З	3293	0	0
Харків Пас. парк «Н» – Нова Баварія одноколійна	Д	0	0	0
	З	3285	0	0
Блок пост 5 км – Зміїв з'єднувальна	Д	0	0	0
	З	2072	0	0
Залютине – Харків Пас. парк «Н» одноколійна	Д	0	0	0
	З	2299	1	0
Харків Слобід. – Нова Баварія одноколійна	Д	0	0	0
	З	2887	3	0
Нова Баварія – Основа одноколійна	Д	0	0	0
	З	3190	2	0
Нова Баварія – Пост 243 км одноколійна	Д	0	0	0
	З	1910	0	0

Продовження табл. А.1

1	2	3	4	5
З'їзди головних колій	Д	23	0	0
	З	1628	0	0
Головні колії разом	Д	203	42	1
	З	485697	590	0
Станційні колії				
ст. Харків Сортивальний	Д	11324	1392	282
	З	106415	21	0
ст. Харків Пас. вантажний двір (ст. Харків Товарний)	Д	848	150	0
	З	3601	0	0
ст. Харків Пасажирський	Д	4748	1409	215
	З	33081	1	0
ст. Харків Пас. парк «Н»	Д	453	0	5
	З	1919	0	0
ст. Покотилівка	Д	65	0	0
	З	1163	0	0
ст. Мерефа	Д	4194	934	121
	З	22238	0	0
ст. Буди	Д	989	514	0
	З	4927	0	0
ст. Мож	Д	375	0	0
	З	300	0	0
ст. Нова Баварія	Д	2304	1207	134
	З	19723	90	0
ст. Роз'їзд 10 км	Д	0	0	0
	З	1869	15	0
ст. Люботин	Д	0	0	0
	З	160	0	0
ст. Дергачі	Д	430	34	15
	З	8708	5	0
ст. Слатине	Д	84	0	0
	З	4554	0	0
ст. Козача Лопань	Д	560	129	0
	З	12905	22	0
Станційні колії разом	Д	26374	5769	772
	З	221403	154	0
Приймально-відправні колії				
ст. Харків Сортивальний	Д	6295	653	38
	З	44631	10	0
ст. Харків Пас. вантажний двір (ст. Харків Товарний)	Д	0	0	0
	З	0	0	0

Продовження табл. А.1

1	2	3	4	5
ст. Харків Пасажирський	Д	382	586	56
	З	17395	5	0
ст. Харків Пас. парк «Н»	Д	0	0	0
	З	811	0	0
ст. Покотилівка	Д	0	0	0
	З	1042	0	0
ст. Мерефа	Д	458	11	0
	З	14925	0	0
ст. Буди	Д	0	0	0
	З	3233	0	0
ст. Мжа	Д	0	0	0
	З	1477	0	0
ст. Люботин	Д	0	0	0
	З	0	0	0
ст. Нова Баварія	Д	154	155	0
	З	10599	0	0
ст. Роз'їзд 10 км	Д	0	0	0
	З	1783	15	0
ст. Дергачі	Д	2	3	0
	З	4934	2	0
ст. Слатине	Д	0	0	0
	З	3240	0	0
Приймально-відправні колії разом	Д	7291	1408	99
	З	112139	32	0
Під'їзні колії				
Під'їзні колії разом	Д	4778	2945	1190
	З	6117	164	7

ДОДАТОК Б

РЕЗУЛЬТАТИ ВИМІРЮВАНЬ ЕЛЕКТРИЧНОГО ОПОРУ МОДЕЛЕЙ

Таблиця Б.1 – Результати вимірювання електричного опору моделей без навантаження

Мо- дель	Електричний опір R, кОм													
	Виміряний на перемінному струмі	Виміряний на постійному струмі без зміни полярності через час, с після вмикання приладу												
		0	1	1,5	2	5	10	15	20	Примітка	Середній після стабілізації			
S1	19,5	18,0			12530	901	907	<i>916</i>	925	939	Зростає	918	1164	905
S2	17,0			31710	12980	905	898	<i>892</i>	886	880	Знижується	892		
S3	17,5				14240	1693	1689	<i>1683</i>	1677	1671	Знижується	1683		
C1	127,5	126,5	48320	36740	17760	1907	1909	<i>1914</i>	1918	1922	Зростає	1916	1359	1560
C3	126,0		48830	36470	17570	1198	1200	<i>1205</i>	1209	1213	Зростає	1205		
C2*	126,0			37590	3801	938	948	<i>950</i>	967	956	Знижується	955		

Мо- дель	Електричний опір R, кОм, виміряний на постійному струмі зі зміною полярності через час, с після вмикання приладу																								
	первинний вимір											вимір після перерви 1 хв зі зміненою полярністю													
	0	2	3	5	7	10	12	15	20	Прим.	Сер.	0	2	3	5	7	10	12	15	20	Прим.	Середній			
S1	20,70	19,74	19,86	21,77	24,58	29,13	32,01	36,47	43,07	Зрост.	27,5		2007	1999	1978	1950	<i>1931</i>	1912	1890	1852	Зниж.	1940	1828	926	
S2	30,54	11,07	12,51	15,14	16,82	22,25	24,21	26,79	30,39	Зрост.	19,9	23,9	1579	1561	1549	1517	1493	<i>1456</i>	1435	1406	1361	Зниж.			1484
S3		17,64	17,63	19,55	21,51	24,10	27,23	30,32	35,45	Зрост.	24,2		2112	2106	2090	2074	<i>2050</i>	2036	2016	1985	Зниж.	2059			
C1		19,94	21,81	24,47	26,90	30,25	32,57	35,52	40,43	Зрост.	29,0		51,3	53,70	54,50	57,10	59,70	<i>62,20</i>	65,00	67,00	72,5	Зрост.	61,5	510	447
C3		14,51	15,69	19,00	21,67	25,40	27,01	31,42	36,84	Зрост.	23,9	385	1441	1434	1424	1404	1387	<i>1363</i>	1349	1320	1299	Зниж.	1380		
C2*		1099	1099	1101	1102	<i>1104</i>	1105	1107	1110	Зрост.	1103		89,0	88,70	87,10	87,00	86,30	<i>85,90</i>	85,80	86,10	87,00	Зниж.	1380		

ДОДАТОК В

ПАТЕНТИ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ
ТА ЗАЯВКИ НА ВИДАЧУ ПАТЕНТІВ НА ВІНАХІД



(11) **159801**

(19) **UA**

(51) МПК
E01B 3/34 (2006.01)
E04G 21/12 (2006.01)

(21) Номер заявки: **u 2023 06182**

(22) Дата подання заявки: **18.12.2023**

(24) Дата, з якої є чинними права інтелектуальної власності: **10.07.2025**

(46) Дата публікації відомостей про державну реєстрацію та номер Бюлетеня: **09.07.2025, Бюл. № 28**

(72) Винахідники:
Плугін Андрій Аркадійович, UA,
Плугін Дмитро Артурович, UA,
Муригін Максим Андрійович, UA,
Панченко Сергій Володимирович, UA,
Трикоз Людмила Вікторівна, UA,
Чжи Веньзон, GB,
Лобяк Олексій Вікторович, UA,
Муригін Андрій Вікторович, UA,
Плугін Олексій Андрійович, UA,
Калюжна Олена Вячеславівна, UA,
Муригіна Надія Олександрівна, UA,
Дудін Олексій Андрійович, UA,
Наджафов Ельшад Фаїр Огли, AZ

(73) Володілець:
УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ,
майдан Фейєрбаха, 7, м. Харків, 61050, UA

(54) Назва корисної моделі:
СПОСІБ ВИГОТОВЛЕННЯ ШПАЛ ІЗ БЕТОНУ З ПОПЕРЕДНЬО НАПРУЖЕНОЮ АРМАТУРОЮ

(57) Формула корисної моделі:
Спосіб виготовлення шпал із бетону з попередньо напруженою арматурою, що включає встановлення форми на виробничому в перевернутому положенні, установлення у форму анкерів і пакета арматури з випуском її кінців через торцеві стінки форми, натягнення арматури, передавання натягу на форму, заповнення форми бетонною сумішшю та її ущільнення, після твердіння бетону - передавання натягу арматури з форми на бетон з обрізанням її кінців, вилучення готової шпалі із форми, який відрізняється тим, що застосовують стержневу композитну арматуру, а кінці стержнів закріплюють за торцеві стінки форми, в зоні підрезових площадок шпал владтовують хомути-розпірки, натягнення арматури здійснюють стягуванням всередині шпалі в поперечному вертикальному та горизонтальному напрямках з фіксацією взаємного положення стержнів вертикальними та горизонтальними скобами-стяжками.

Сторінка 3 із 6

Рис. В.1 – Патент на корисну модель № 159801



(11) **155132**

(19) **UA** (51) МПК **E04B 5/10 (2006.01)**

(21) Номер заявки: **u 2023 04061** (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

(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**

(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'язучої речовини та дрібного залізновача, його просоченні водою, розкочуванні та розміщенні 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 поширюють у зазор між плитою та балкою, забезпечуючи його обтиснення на 20-40 % висоти.

Сторінка 3 із 4

Рис. В.2 – Патент на корисну модель № 155132

а)

Форма В6


МІНЕКОНОМІКИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ
ДЕРЖАВНА ОРГАНІЗАЦІЯ
«УКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ОФІС
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ ТА ІННОВАЦІЙ»
(УКРІНОВІ)
 вул. Дмитра Гоголя, 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 галузі ЄДРПОУ 44673629

22.05.2025 № 10542/3А/25

Адреса для листування
 УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ
 УНІВЕРСИТЕТ ЗАЛІЗНИЧНОГО
 ТРАНСПОРТУ, НАУКОВО-ДОСЛІДНА
 ЧАСТИНА,
 площа Фейєрбаха, буд. 7, кім. 1-318, м.
 Харків, 61050

Стосується заявки № а 2023 06180
 / при листуванні просимо посилається на цей № /

Повідомлення про завершення формальної експертизи за заявкою на винахід

(21) Реєстраційний номер заявки а 2023 06180
 (22) Дата подання 18.12.2023
 (71) Заявник(и)
 УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ
 (72) Повне ім'я винахідника(ів)
 Плуґін Андрій Аркадійович, Плуґін Дмитро Артурович, Муриґін Максим Андрійович, Панченко Сергій Володимирович, Трикоз Людмила Вікторівна, Чаки Веньзон (GB), Лобак Олексій Вікторович, Муриґін Андрій Вікторович, Плуґін Олексій Аркадійович, Калюжна Олена Вячеславівна, Муриґіна Надія Олександрівна, Дудін Олексій Аркадійович, Наджафов Ельшад Фаїр Огли (AZ)
 (51) МПК
 E01B 3/34 (2006.01)
 E04G 21/12 (2006.01)
 (54) Назва винаходу
 СПОСІБ ВИГОТОВЛЕННЯ ШПАЛ ІЗ БЕТОНУ З ПОПЕРЕДНЬО НАПРУЖЕНОЮ АРМАТУРОЮ

Відповідно до частини чотирнадцятої статті 16 Закону України «Про охорону прав на винаходи і корисні моделі» (далі – Закон) повідомляємо про завершення формальної експертизи та можливість проведення кваліфікаційної експертизи за умови дотримання вимог частини дев'ятнадцятої статті 16 Закону.
 Нагадуємо, що згідно з частиною дев'ятнадцятою статті 16 Закону, кваліфікаційна експертиза проводиться після одержання НОІВ відповідної заявки та сплати збору за її проведення.

б)

а202306180 2

Заявник може подати зазначені заяву та сплатити збір (код збору 11600 відповідно до Порядку сплати зборів за дії, пов'язані з охороною прав на об'єкти інтелектуальної власності, затвердженою постановою Кабінету Міністрів України від 23.12.2004 р. № 1716 із змінами (далі - Порядок)) у розмірі 720,00 грн. протягом трьох років від дати подання заявки.
 Строк подання зазначеної заяви та документа продовжується, але не більше, ніж на шість місяців, якщо до його спливу буде подано відповідні клопотання та сплачено збір за його подання (код збору 11700 відповідно до Порядку). Цей строк, пропущений з поважних причин, поновлюється (права заявника щодо заявки відновлюються), якщо протягом дванадцяти місяців від його спливу буде подано відповідні клопотання та сплачено збір за його подання (код збору 11800 відповідно до Порядку). Якщо заявник не виконає зазначених вимог у встановлений строк, то заявка вважатиметься відкликаною.
 Нагадуємо, що збори сплачуються за такими реквізитами:
Отримувач: УКРІНОВІ
Код отримувача: 44673629
Банк отримувача: АТ КБ «ПРИВАТБАНК», м. Київ
SWIFT: PBANUA2X
Рахунок отримувача (IBAN):
(UAH) - UA8930529900002600406240479 (980)
(EUR) - UA79305299000026001006232841 (978)
(USD) - UA93305299000026003046229210 (840)
(CHF) - UA90305299000026009046230612 (756)

Начальник відділу експертизи національних заявок у технічних галузях  Марина ПОГРЕБНА
 Телефон 494-05-43

Провідний експерт  Інна ЯВТУШИНСЬКА
 Телефон 494-05-41

Форма В4


МІНЕКОНОМІКИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ
ДЕРЖАВНА ОРГАНІЗАЦІЯ
«УКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ОФІС
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ ТА ІННОВАЦІЙ»
(УКРІНОВІ)
 вул. Дмитра Гоголя, 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 галузі 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 БЕЗБАЛІСТНОГО МОСТОВОГО ПОЛОТНА ЗАЛІЗНИЧНИХ МОСТІВ ІЗ ЗАПЕЧЕТОВАНИМИ ПІЛІТ

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 28.08.2023

Начальник сектору встановлення дати подання заявок  Любова ЛУЦЕНКО
 Телефон 494-05-98

Провідний експерт  Людмила ЯВОРСЬКА

Рис. В.3 – Заявки на винаходи: а – повідомлення про завершення формальної експертизи за заявкою № а 2023 06180;

б – повідомлення про встановлення дати подання заявки на винахід № а 2023 04060

ДОДАТОК Г

РЕКОМЕНДАЦІЇ З ВИБОРУ КОНСТРУКЦІЇ
І ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ШПАЛ

Міністерство освіти і науки України
 Український державний університет залізничного транспорту
 майдан Фейербаха 7, Харків 61050
 тел. +38 057 7301969; e-mail: info@kart.edu.ua

Погоджено:

Директор ТОВ «КПУ»
 Дмитро ІВАНЮК
 23 жовтня 2024 р.



Затверджую:

Проректор з науково-педагогічної роботи УкрДУЗТ
 к.т.н., доц.
 Артур КАГРАМАНЯН
 22 жовтня 2024 р.



РЕКОМЕНДАЦІЇ

з вибору конструкції і технології виробництва залізобетонних шпал

Розроблено:

Зав. кафедри залізничної колії і транспортних споруд, науковий керівник ГНДЛ підрейкових основі спец залізобетону УкрДУЗТ

д.т.н., проф.

Андрій ПЛУГІН

Аспірант

Максим МУРИГІН

Аспірант

Сергій МУСІЄНКО

Аспірант

Кирило КУЦІН

21 жовтня 2024 р.

Харків 2024

Рекомендації розроблені Українським державним університетом залізничного транспорту (УкрДУЗТ) для Товариства з обмеженою відповідальністю «Гранпостач Україна» (ТОВ «ГПУ»).

ТОВ «ГПУ» планує будівництво на власній промисловій площадці технологічної лінії з виробництва залізобетонних шпал, конкурентоздатних на ринку України та країн Європейського Союзу. Для організації виробництва передбачене конструювання шпал та замовлення у світових виробників технологічного обладнання.

Рекомендації призначені для вибору конструкції і технології виробництва залізобетонних шпал і ґрунтуються на результатах досліджень, виконаних на кафедрі залізничної колії і транспортних споруд і галузевої науково-дослідної лабораторії підрейкових основ і спецзалізобетону УкрДУЗТ, у т.ч. у складі дисертаційних досліджень аспірантів Максима Муригіна, Сергія Мусієнка, Кирила Куцина.

1 Нормативні вимоги до шпал

Шпали мають відповідати вимогам ДСТУ Б В.2.6-209:2016 «Шпали залізобетонні попередньо напружені для залізниць колії 1520 і 1435 мм. Технічні умови» зі зміною №1 та ДСТУ EN 13230-1:2018 «Залізничний транспорт. Колія. Бетонні шпали та опори. Частина 1. Загальні вимоги (EN 13230-1:2016, IDT)».

Відповідність шпал вимогам одночасно обох зазначених стандартів та/або можливість низьковитратного переналагодження технології на виробництво шпал за одним з них на інший забезпечить підвищення конкурентоздатності продукції в цілому.

2 Тип шпал

За базовий рекомендується прийняти тип шпал для безпідкладкових шурупно-дюбельних пружних рейкових скріплень, зокрема тип Ш9 за ДСТУ Б В.2.6-209:2016, та рейок типу Р65, UIC60, 60E1.

Можливість низьковитратного переналагодження технології на виробництво шпал інших типів, зокрема, Ш1, СБЗ за ДСТУ Б В.2.6-209:2016 забезпечить підвищення конкурентоздатності продукції в цілому.

3 Конструкція шпал і технічні вимоги до них

Рекомендується:

- армувати шпали попередньо напружуваною стержневою арматурою або високоміцним дротом діаметром не менше 7 мм, арматуру розташовувати у два горизонтальних ряди;
- зусилля натягу арматурного пакету прийняти не менше 392 кН;
- на доповнення до зчеплення арматури з бетоном забезпечити її анкерування в бетоні на кінцях шпал;
- не допускати випуски арматури на торцях шпал, захищати торці арматурних стержнів бетоном або цементно-піщаним розчином товщиною не менше 20 мм;
- клас бетону за міцністю на стиск прийняти більш високий, ніж С35/45;
- прийняти контрольне навантаження під час випробування шпал на тріщиностійкість 147 кН для підрейкового перерізу та 117,7 кН для середнього перерізу.

4 Технологія виробництва шпал

Попередній натяг арматури рекомендується здійснювати на силові форми за анкерні пластини за допомогою високоміцних болтів, пропущених через отвори в торцях форм.

Конструкція анкерних пластин та закріплення арматури за них має унеможливити проковзування арматури в бетоні за забезпечувати поперечне армування від подовжніх тріщин на кінцях шпали, для чого:

- анкерні пластини мають бути спільними для горизонтального ряду арматури, окремими для верхнього та нижнього ряду;

- арматура має пропускатись через отвори в анкерних пластинах і закріплюватись за них висадженням головок, обтискними шайбами тощо.

Конструкція анкерної пластини, зазор між нею та торцем форми має забезпечувати можливість застосування композитної арматури замість сталевोї.

ДОДАТОК Д

ПРОТОКОЛ ВИПРОБУВАНЬ ШПАЛ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ПОПЕРЕДНЬО-
НАПРУЖЕНИХ З АНКЕРОВАНОЮ СТЕРЖНЕВОЮ АРМАТУРОЮ Ш9.2

Міністерство освіти і науки України
Український державний університет залізничного транспорту

Центр діагностики споруд транспортного призначення

(свідоцтво про відповідність системи вимірювань
вимогам ДСТУ ISO 10012:2005 № 01-0089/2024 від 23.12.2024)

майдан Оборонний Вал 7, Харків 61050
тел. +38 057 730 1969; e-mail: info@kart.edu.ua

Затверджую:

Проректор з науково-
педагогічної роботи УкрДУЗТ

к.т.н., доц. **Артур КАГРАМАНЯН**

08 квітня 2025 р.

ПРОТОКОЛ

випробувань шпал залізобетонних попередньо-напружених
з анкерованою стержневою арматурою Ш9.2

від 07 квітня 2025 р.

Шифр: 6/6-2025

Аркушів 3

Директор центру діагностики споруд
транспортного призначення

к.т.н., доц.

Олексій ЛОБЯК

08 квітня 2025 р.

Науковий керівник ГНДЛ підрейкових основ
і спеціалізованих бетонів

д.т.н., проф.

Андрій ПЛУГІН

08 квітня 2025 р.

Харків 2025

Протокол від 07.04.2025

шифр 6/6-2025

аркушів 3, аркуш 2

1. Замовник – Товариство з обмеженою відповідальністю «ГРАНПОСТАЧ УКРАЇНА».

2. Об'єкт випробувань – шпали залізобетонні попередньо-напружені з анкерованою стержневою арматурою Ш9.2 в кількості 3 шт.

3. Підстава – договір між ТОВ «ГПУ» і УкрДУЗТ № 6/6-2025.

4. Дата отримання зразків – 04.04.2025.

5. Мета випробувань – перевірка на відповідність вимогам до тріщиностійкості ДСТУ Б В.2.6-209:2016 Шпали залізобетонні попередньо напружені для залізниць колії 1520 і 1435 мм. Технічні умови.

6. Час та місце проведення випробувань – 07.04.2025, науково-дослідна лабораторія підрейкових основ і спеціалізованого бетону.

7. Умови випробувань:

- температура повітря – плюс 17°C;
- відносна вологість повітря – 85 %;
- атмосферний тиск – 990 гПа.

8. Технічні характеристики об'єкту випробувань: шпала залізобетонна попередньо напружена типу Ш9 марки Ш9.2 колії 1520 мм для рейок Р65 та безпідкладочного проміжного пружного рейкового скріплення з різьбовим шурупно-дюбельним прикріпленням рейки до шпали, армована високоміцним дротом Ø7-1770-R2 EN 10138-2 окремими стержнями в кількості 8 шт. з анкерними плитами із зусиллям початкового натягу не менше 430 кН, із бетону важкого класу за міцністю на стиск С50/60.

9. Засоби випробувань:

Найменування	Виробник	Модель	Заводський номер	Погрішність вимірювання
1	2	3	4	5
Прес гідравлічний для випробувань залізобетонних шпал	Diósgyöri Gépgyár (Hungary)	VIZS PRES	1968-4	2 кН

Протокол від 07.04.2025

шифр 6/6-2025

аркушів 3, аркуш 3

10. Результати випробувань

Шпала Ш9.2			Наявність тріщин в перерізі під контрольним навантаженням (для підрейкових перерізів – 130 кН, для середнього перерізу – 98 кН)			Висновок про відповідність вимогам ДСТУ Б В.2.6-209:2016 до тріщиностійкості
№	№ партії	№ форми/гнізда	підрейкових		середньому	
			лівому	правому		
1	1803	094/2	немає	немає	немає	відповідає
2	1803	094/4	немає	немає	немає	відповідає
3	1803	099/1	немає	немає	немає	відповідає

Висновок

Випробувані шпали залізобетонні попередньо-напружені з анкерованою стержневою арматурою Ш9.2 відповідають вимогам ДСТУ Б В.2.6-209:2016 до тріщиностійкості.

Випробування виконали:

Зав. кафедри будівельних матеріалів,
конструкцій та споруд
д.т.н., проф.



Дмитро ПЛУГІН

Зав. ГНДЛ підрейкових основ
і спецзалізобетону к.т.н., доц.



Олег КАЛІНІН

Аспіранти



Максим МУРИГІН



Сергій МУСІЄНКО



Кирило КУЦІН

ДОДАТОК Е

АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ



ЗАТВЕРДЖУЮ:

Директор ТОВ «ГПУ»

Дмитро ІВАНЮК

« 25 » лютого 2026 р.

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

«Рекомендацій з вибору конструкції
і технології виробництва залізобетонних шпал»

м. Хмельник, Вінницька обл.

25.02.2026

Ми, що підписалися нижче:

- від Товариства з обмеженою відповідальністю «ГРАНПОСТАЧ УКРАЇНА» (ТОВ «ГПУ») головний інженер Данило ГАДАЙЧУК,
- від кафедри залізничної колії і транспортних споруд Українського державного університету залізничного транспорту (УкрДУЗТ) завідувач кафедри Андрій ПЛУГІН, аспіранти Максим МУРИГІН, Сергій МУСІЄНКО, Кирило КУЦІН – автори «Рекомендацій з вибору конструкції і технології виробництва залізобетонних шпал» від 21.10. 2024

склали цей акт про те, що за станом на 23.02.2026 ТОВ «ГПУ» з урахуванням зазначених «Рекомендацій...» розроблено конструкцію залізобетонних шпал типу Ш9.2, армованих анкерованим попередньо напруженим високоміцним дротом 8Ø7 мм (креслення Ш9.2.000.00.СК), уведено в експлуатацію технологічну лінію з їх виробництва та поставлено шпали на виробництво.

Випробування партії шпал на тріщиностійкість, проведені акредитованим Центром діагностики транспортних споруд УкрДУЗТ, показало та підтвердило їх відповідність вимогам ДСТУ Б В.2.6-209:2016 (протокол 6/6-2025 від 07.04.2025). Шпали сертифіковано на відповідність ДСТУ Б В.2.6-209:2016 і ДСТУ EN 13230-1:2018.

Впровадження зазначених «Рекомендацій...» шляхом уведення в експлуатацію технологічної лінії і поставлення шпал на виробництво забезпечило соціально-економічний ефект, а саме: створено 15 робочих місць, збільшено обсяг прибутку товариства та, відповідно, збільшено обсяги

надходження до бюджетів різних рівнів у вигляді обов'язкових та податкових платежів.

Інформація щодо частка прибутку від виробництва інвал у загальній структурі прибутку товариства є комерційною тайною та не підлягає розголошенню.

Від ТОВ «ГПУ»:



Данило ГАДАЙЧУК

Від УкрДУЗТ:



Андрій ІЛУГІН

Максим МУРИГІН

Сергій МУСІЄНКО

Кирило КУЦІН

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Проректор з науково-педагогічної роботи
Українського державного університету
залізничного транспорту



Владислав ПАНЧЕНКО

березня 2026 р.

ДОВІДКА

про впровадження результатів дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора філософії МУРИГІНА Максима Андрійовича
«Залізничні шпали із бетону з композитною арматурою»

Результати дисертаційного дослідження Максима МУРИГІНА використані у навчальному процесі за спеціальностями J7 Залізничний транспорт, G19 Будівництво та цивільна інженерія, зокрема їх освітніми програмами всіх освітніх рівнів «Залізничні споруди та колійне господарство», «Управління колійним комплексом залізниць, промислового та міського транспорту», «Промислове та цивільне будівництво» в освітніх компонентах: «Залізнична колія (улаштування та проектування рейкової колії)», «Улаштування та утримання колії на ділянках автоблокування та електричної тяги», «Залізобетонні конструкції (спецкурс)», «Сучасні технічні рішення щодо підвищення надійності елементів залізничної колії», «Модифікація бетонів і будівельних розчинів хімічними, мінеральними добавками та полімерами», у дипломному проектуванні.

Результати дисертаційного дослідження Максима МУРИГІНА використані у науково-дослідних роботах:

“Integrated rail freight optimisation in Ukraine: Railway sleepers, rolling stock and logistics” (ДР№0123U102700), що виконувалась УкрДУЗТ за кошти UK-Ukraine R&I twinning grants scheme, project 11150 у 2023-24 pp.;

«Теоретичні та експериментальні основи створення композиційних матеріалів на основі мінеральних в'язучих для захисту від електрокорозії і ремонту споруд залізничного транспорту» (ДР№0122U002125);

«Теоретичні та експериментальні основи створення стійких до електричних і динамічних впливів бетонних виробів з композитною арматурою для будівництва та відновлення електрифікованих ділянок залізниць» (ДР№0126U002127),

що виконувались/виконуються УкрДУЗТ у 2022-23 і 2026 pp., відповідно, за кошти державного бюджету України.

Декан будівельного факультету
к.т.н., доцент

Олексій ДУДІН